



Bruno Miguel
Leitão Gameiro

**ANÁLISE DO RENDIMENTO DE UM
DESTILADOR SOLAR INTEGRADO NUMA
ESTUFA**

**“Análisis del rendimiento de un destilador
solar en un invernadero”**

**“Performance analysis of a solar still
integrated in a greenhouse”**



**Bruno Miguel
Leitão Gameiro**

**ANÁLISE DO RENDIMENTO DE UM
DESTILADOR SOLAR INTEGRADO NUMA
ESTUFA**

**“Análisis del rendimiento de un destilador
solar en un invernadero”**

**“Performance analysis of a solar still
integrated in a greenhouse”**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Realizada na Universidade Politécnica de Valencia, sob a orientação científica conjunta dos: Doutor Eugenio García Marí e Rosa Penélope Gutiérrez, Director e Professora do Departamento de Departamento de Engenharia Rural e Agroalimentaria da Universidade Politécnica de Valencia; António Barbosa Samagaio, Professor do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

o júri

Presidente

Prof. Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda

professora associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da
Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de
Aveiro

Prof. Doutor António José Barbosa Samagaio

professor associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da
Universidade de Aveiro



Agradecimentos

Aos meus orientadores, Eugénio García Marí e Rosa Penélope Gutiérrez da Universidadde Politécnica de Valencia por todo o apoio e dedicação demonstrado ao longo da realização de este trabalho.

À minha mae e à Lucía por todo o carinho e apoio ao longo deste caminho.



palavras-chave

Energia solar, radiação solar, destilação, estufa, construção, materiais de construção, transmitâncias, agricultura, necessidades de rego.

Resumo

A crescente limitação de água disponível em regiões áridas, resultou na utilização de águas pouco apropriadas para regadio na agricultura, o que pode induzir uma redução de rendimento e qualidade dos cultivos tal como prejudicar o meio ambiente.

O presente trabalho propõe-se a analisar o comportamento e o rendimento de um destilador solar integrado numa estufa, para as condições climáticas existentes na costa mediterrânea do este de Espanha. Para tal um destilador solar com uma área de superfície de 28 m^2 , foi instalado dentro da secção superior, isolado da secção do cultivo, de uma estufa experimental. O estudo concentrou-se na análise do desenho e materiais de construção, no conjunto de transmitâncias do sistema, na influência das variáveis climáticas registradas dentro e fora do sistema (estufa-destilador solar), e nos volumes e períodos horários e diários de destilação obtidos.

O comportamento do destilador solar integrado resultou ser diferente do comportamento de um destilador convencional, tendo volumes de produção inferiores e ocorrendo o período de destilação ao final do dia e prolongado-se durante a noite. No entanto, apresentou volumes de destilado suficientes para que mediante a diluição da água imprópria original, satisfazer os requisitos de qualidade e as necessidades mínimas de rego de alguns cultivos.



palabras-clave

Energía solar, radiación solar, destilación, riego en invernadero, construcción, materiales de construcción, transmitancias, agricultura, necesidades de riego.

Resumen

La limitación cada vez mayor del agua disponible en las regiones áridas, ha supuesto el uso de aguas inapropiadas para el riego en la agricultura, lo que puede inducir reducciones en el rendimiento y calidad de los cultivos, así como dañar el medio ambiente.

Este trabajo se propone el estudio y análisis del comportamiento y rendimiento de un destilador solar integrado en un invernadero, para las condiciones climáticas existentes en la costa Este de España. Para ello se ha instalado un destilador solar con una superficie de 28 m², dentro de la sección superior, aislado de la sección del cultivo, de un invernadero experimental. El estudio se centró en el análisis del diseño y materiales de construcción, en la transmisión global del sistema, en la influencia de las variables climáticas registradas dentro y fuera del sistema (invernadero-destilador solar), y volumen y periodo de destilación horarios y diarios obtenidos. El comportamiento del destilador solar integrado resultó ser diferente del comportamiento de un destilador solar convencional, presentando volúmenes de producción más bajos y produciéndose el período de destilación al final del día y prologándose por la noche. Sin embargo, los volúmenes de destilado obtenidos han sido suficientes, para que, mediante la dilución del agua inapropiada original, satisfacer los requisitos de calidad y de necesidades mínimas de riego de algunos cultivos.



keywords

Solar Energy, solar radiation, water distillation, greenhouse construction and building materials, sun light transmittance, agriculture water needs for irrigation.

Abstract

The increasing limitation of available water in arid regions resulted in the application of the waters unsuitable for irrigation in agriculture, which can induce a reduction in yield and quality of crops, and damage the environment.

This paper proposes to examine the behaviour and performance of a solar still integrated in greenhouse, for the climatic conditions existing on the Mediterranean East coast of Spain. To this propose a solar still with a surface area of 28 m² was installed inside the roof section, isolated from the crops section, in an experiment greenhouse. The study focused on the analysis of the design and construction materials, overall transmittance of the system, the influence of climatic variables recorded within and outside the system (greenhouse-solar still), and the hourly and daily amount of distillation produced such as the period and duration of distillation.

The behaviour of the integrated solar still turned out to be different from the behaviour of a conventional solar still, with lower production volumes and periods of distillation at the end of the day and overnight. However, volumes of distillate obtained were enough for satisfy, by diluting the original improper water, the quality requisites and the minimal needs of irrigation of some crops.



ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Demanda del Agua.....	1
1.2 Agricultura en Ambiente Controlado	2
1.2.1 Invernadero	2
1.2.2 Objetivos del Cultivo en Ambiente Controlado	3
1.2.3 Riego en Invernadero	4
1.2.3.1 Sistemas de Riego.....	5
1.2.3.2 Calidad del agua para Riego	6
1.2.3.3 Fuentes de Agua para Riego.....	7
1.2.3.4 Consumo de agua para riego en Cultivos de Ambiente Controlado	8
1.3 Desaladora Térmica usando la Energía Solar (Destilador Solar)	9
1.3.1 Energía solar	9
1.3.2 Destilador Solar	12
1.3.2.1 Efectos de las Condiciones Climáticas.....	14
1.3.2.2 Efectos de los Parámetros del Diseño del destilador solar	15
1.4 Destilador solar integrado en un invernadero	16
1.5 Objetivos e Hipótesis	19
2 MATERIAL Y METODOLOGÍA.....	20
2.1 Descripción del Sistema.....	20
2.1.1 Invernadero	20



2.1.2	Destilador Solar	22
2.1.3	Sistemas de Medición y Adquisición de datos	23
2.1.3.1	Medición y adquisición de las variables climáticas	23
2.1.3.2	Medición de la cantidad de destilado producido.....	26
2.2	Comportamiento del sistema del destilador solar	27
2.2.1	Transferencia Calorífica por Convección entre el agua del destilador y el cristal del destilador solar.....	28
2.2.2	Transferencia Másica y Calorífica por evaporación entre el agua y el cristal del destilador solar.....	29
2.3	Descripción de la experiencia	30
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
3.1	Datos obtenidos.....	31
3.1.1	Estado del clima de los días analizados.....	31
3.1.2	Radiación Solar Global y Radiación solar PAR.....	31
3.1.3	Análisis de las variables climáticas del sistema invernadero-destilador solar, y del agua destilada producida	37
3.1.3.1	Temperatura en la sección del destilador y del invernadero.....	37
3.1.3.2	Temperatura del agua de las cubetas y del cristal de la cubierta, Humedad relativa y Destilado Producido	40
3.1.4	Análisis de las cantidades de destilado producido.....	47
3.1.5	Simulación de la producción de destilado mediante la aplicación de un modelo teórico de transferencia de masa y calor.....	49
3.1.6	Viabilidad en la aplicación del destilado producido para riego de cultivos bajo invernadero	54
4	CONCLUSIONES	59
	BIBLIOGRAFÍA	62
	ANEXO 1	1
	ANEXO 2	1



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Distribución del agua del planeta. Fuente: (U.S.G.S., 2008).....	1
Figura 2 – Dibujo e imagen de un invernadero. Adaptado de (Inverdaderos, 2006)	3
Figura 3 - Evolución a lo largo de un día nublado y un día soleado de la radiación solar y la transpiración de un cultivo de melón bajo invernadero (Fernández, y otros, 2006).	8
Figura 4 - Radiación solar media recibida en superficie, expresada en W/m^2 . Oscila entre un máximo de unos $275 W/m^2$ en las regiones despejadas de nubosidad del Sahara y Arabia, hasta un mínimo de $75 W/m^2$ en las islas brumosas del Ártico. (Fuente: Uriarte, 2008).....	11
Figura 5 - Distribución de la Irradiación Global Media en España, Enero de 2005 (Kwh/m^2).	12
Figura 6 - Destilador solar básico, adaptado de: Bueros, (2000)	13
Figura 7 - Esquema de un destilador solar integrado en un invernadero.	17
Figura 8 – Dimensiones del invernadero mostrado, del destilador, de las cubetas y estructura soporte.....	21
Figura 9 - Foto del invernadero testado.....	21
Figura 10 – Foto de la cubierta del destilador.	22
Figura 11 – Foto de la estructura de apoyo al destilador solar.	22
Figura 12 – Cubetas de policarbonato aisladas del interior del invernadero.....	22
Figura 13 – Canalones de aluminio calado.....	22
Figura 14 – Condensación.	23
Figura 15 – Sistema de suministro del agua.	23
Figura 16- Esquema con la localización de los sensores dentro y fuera del invernadero así como dentro de la sección del destilador solar.	24
Figura 17- Módulos.	25
Figura 18- Ordenador.	25
Figura 19 - Aplicación LABVIEW.	26
Figura 20 - Aplicación LABVIEW.	26



Figura 21- Sistema de medición de la producción del agua destilada.....	27
Figura 22- Foto del sistema de medición del destilado.	27
Figura 23 – Variación horaria de la radiación solar global (W/m^2) registrada en el día 28 de enero de 2005.	32
Figura 24 – Variación horaria de la radiación solar PAR ($\mu\text{mol/m}^2$) registrada en el día 28 de Enero de 2005.	33
Figura 25 - Variación horaria de la radiación solar global (W/m^2) y radiación solar PAR ($\mu\text{mol/m}^2$) registrada en el día 28 de Enero de 2005.	34
Figura 26 – Variación horaria de la radiación solar global (W/m^2) y radiación solar PAR ($\mu\text{mol/m}^2$) registrada en el día 27 de Abril de 2005.	35
Figura 27 - Variación horaria de la radiación solar global (W/m^2) y radiación solar PAR ($\mu\text{mol/m}^2$) registrada en el día 7 de Mayo de 2005.	35
Figura 28 – Variación horaria de la temperatura exterior y de las temperaturas interiores de las secciones del destilador y invernadero, durante el día 28-29 de Enero de 2005.	37
Figura 29 – Variación horaria de la temperatura exterior y de las temperaturas del interior de las secciones del destilador e invernadero durante el día 27-28 de Abril de 2005.	38
Figura 30 - Variación horaria de la temperatura exterior y de las temperaturas del interior de las secciones del destilador e invernadero durante el día 7-8 de Mayo de 2005.	39
Figura 31 - Variación horaria de las Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) del agua de las cubetas y del aire del destilador, así como la humedad relativa (%) registrada durante el día 28-29 de Enero.	40
Figura 32 – Variación horaria de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas del destilador y del cristal de la cubierta ($^{\circ}\text{C}$); Humedad relativa (%); y Destilado producido ($\text{kg/m}^2.\text{h}$) durante el día 28-29 de Enero.	41
Figura 33 - Variación horaria de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas del destilador y del cristal de la cubierta ($^{\circ}\text{C}$); Temperatura de rocío del aire del destilado ($^{\circ}\text{C}$); Humedad relativa (%); y Destilado producido ($\text{kg/m}^2.\text{h}$) durante el día 28-29 de Abril.	42
Figura 34 - Variación horaria de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas del destilador y del cristal de la cubierta ($^{\circ}\text{C}$); Temperatura de rocío del aire del destilador ($^{\circ}\text{C}$); Humedad relativa (%); y Destilado producido (kg/m^2) durante el día 27-28 de Abril.	44



Figura 35 - Variación horaria de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas del destilador y del cristal de la cubierta (°C); Temperatura de rocío del aire del destilador; Humedad relativa (%); y Destilado producido (kg/m ²) durante el día 7-8 de Mayo.....	44
Figura 36 – Variación horaria de la producción de destilado (kg/m ²) para los días 28-29 de Enero, 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo de 2005.....	48
Figura 37 – Variación horaria del destilado producido, y del destilado simulado en el día 28-29 de Enero.	50
Figura 38 - Variación horaria del destilado producido, y del destilado simulado en el día 27-28 de Abril.....	50
Figura 39 - Variación horaria del destilado producido, y del destilado simulado en el día 7-8 de Mayo.	50
Figura 40 - Variación horaria del destilado producido, del destilado simulado y del destilado simulado en el día 28-29 de Enero.	52
Figura 41 - Variación horaria del destilado producido, del destilado simulado y del destilado simulado en el día 27-28 de Abril.	52
Figura 42 - Variación horaria del destilado producido, del destilado simulado y del destilado simulado en el día 7-8 de Mayo.	53
Figura 43 – Gráfica que exhibe las diluciones necesarias para cinco tipos de aguas para que sean admisibles por los cultivos, usando el destilado producido en el día 28-29 de Enero.	56
Figura 44 - Gráfica que exhibe las diluciones necesarias para cinco tipos de aguas para que sean admisibles por los cultivos, usando el destilado producido en el día 27-28 de Abril.	57
Figura 45 - Gráfica que exhibe las diluciones necesarias para cinco tipos de aguas para que sean admisibles por los cultivos, usando el destilado producido en el día 7-8 de Mayo. ...	58



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Valores de la mínima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reducen la cosecha a cero (MaxCEe) y valores de la máxima conductividad del agua para riego (CEi) que toleran cada cultivo sin que se reduzcan los rendimientos.	7
Tabla 2 - Necesidades de riego para cultivos bajo invernadero en Almería (l/m ² /día) (Fernández, y otros, 2006).	9
Tabla 3- Ventajear y limitaciones del destilador solar integrado en un invernadero.	18
Tabla 4- Características de los Sensores instalados.	25
Tabla 5 – Condiciones climáticas de los días analizados en año 2005.	31
Tabla 6 - Radiación solar global y radiación solar PAR horaria observada en los distintos puntos del sistema invernadero-destilador solar, durante el día 28 de Enero de 2005. Radiación solar Global y radiación solar PAR diaria durante el día 27 de Abril y 7 de Mayo (* valores no contabilizados para el cálculo de la transmitancia, debido al efecto del sombreado que ha sufrido el piranómetro y el sensor PAR).	36
Tabla 7 – Valores horarios de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas y del cristal de la cubierta (°C); Temperatura de rocío del aire del invernadero (°C); Humedad relativa (%) y destilado producido durante el día 28-29 de Enero.	43
Tabla 8 - Valores horarios de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas y del cristal de la cubierta (°C); Temperatura de rocío del aire del invernadero (°C); Humedad relativa (%) y destilado producido durante los días 27-28 de Abril y 7-8 Mayo. (* Valores no contabilizados para análisis ya que su valor es muy pequeño y poco significativo).	45
Tabla 9 – Volumen diario de destilado producido total y para HR>90%.	46
Tabla 10 – Valores horarios y diarios del destilado producido, durante distintos días del año 2005 (* valores no contabilizados debido a su valor poco significativo).	47
Tabla 11 – Fórmulas de cálculo de cada una de las variables.	49
Tabla 12 – Variación horaria del Destilado real y simulado (kg/m ²) y su correspondiente Humedad relativa (%).	51
Tabla 13 – Variación horaria del destilado simulado ajustado (kg/m ² .h), de la temperatura del agua de las cubetas (°C) y de la temperatura de rocío del aire del destilador (°C).	53



Tabla 14 – Comparación del destilado producido real, del simulado y del simulado ajustado (kg/m ² .d) durante el período de las 14:00 a las 8:00.	54
Tabla 15 – Valores máximos y mínimos de agua necesaria para el riego (l/m ² .d) y la conductividad eléctrica (dS/m) máxima admisible para el buen rendimiento de cada tipo de cultivo.	54
Tabla 16 - Porcentaje de dilución mínima necesaria y volúmenes de agua máximos disponibles para cada tipo de agua (CE: 1; 1,5; 2,5; 2; 3) y cultivo, durante el día 28-29 de Enero. (* Indiferente; # No satisface la necesidad mínima de riego).	55
Tabla 17 - Porcentaje de dilución mínima necesaria y volúmenes de agua máximos disponibles para cada tipo de agua (CE: 1; 1,5; 2,5; 2; 3) y cultivo durante el día 27-28 de Abril. (* Indiferente; # No satisface la necesidad mínima de riego).	56
Tabla 18 - Porcentaje de dilución mínima necesaria y volúmenes de agua máximos disponibles para cada tipo de agua (CE: 1; 1,5; 2,5; 2; 3) y cultivo durante el día 7-8 de Mayo. (* Indiferente; # No satisface la necesidad mínima de riego).	57



1 INTRODUÇÃO

1.1 Demanda del Agua

En la vida la presencia del agua es indispensable, ningún ser vivo conocido puede funcionar sin la existencia del agua, es por eso que en la Tierra donde hay presencia de agua hay vida (Rothschild & Mancinelli, 2001). Es la sustancia más común en el Planeta, cubriendo en su estado líquido y sólido alrededor del 75% de la superficie de éste; está presente en todos los ecosistemas y se desplaza por el planeta a través de su ciclo, evapotranspiración-precipitación-escorrentía (Earth Observatory, 2008). Además es la única sustancia conocida capaz de existir en todos sus estados físicos solido-liquido-gas en el estrecho rango de temperaturas y presiones del aire del Planeta. De toda el agua existente sólo aproximadamente 3% es potable, siendo el restante 97% de agua salada de los océanos (Figura 1).

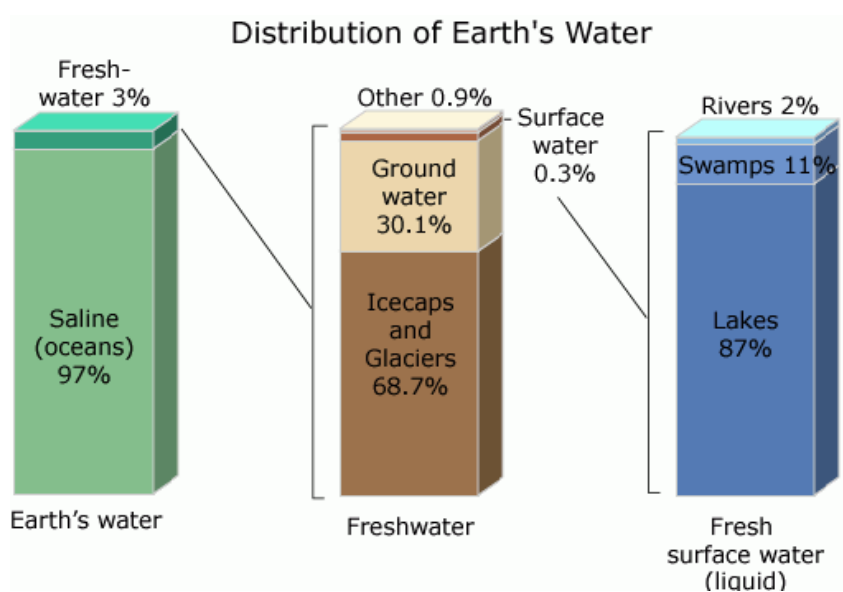


Figura 1- Distribución del agua del planeta. Fuente: (U.S.G.S., 2008)

Más de la mitad del agua potable se encuentra en su estado sólido concentrada en las capas de hielo polares, icebergs y nieve, no estando disponible para uso humano (World Health Organization, 2008). Sólo poco más del 1% de toda el agua del mundo se puede considerar potable y accesible al uso humano, encontrándola en acuíferos subterráneos, ríos, lagos y humedad del suelo.



Si miramos a lo largo de la historia, podemos observar que la presencia de agua siempre ha sido el factor más importante en el desarrollo de ciudades, países y de su economía y bienestar. Todas las ciudades importantes del mundo se han desarrollado alrededor, o en las proximidades de un río o desembocadura con el mar.

Todos los organismos de origen animal y vegetal, que a su vez nos sirven de alimento, necesitan para subsistir de grandes cantidades de agua, por lo que no es de sorprender que la agricultura/ganadería sea el sector mundial que más agua consume. Un 70% del agua potable disponible se destina a agricultura/ganadería, seguido de 20% a la industria, y 10% al uso doméstico.

Con el crecimiento de la población, de la demanda de alimento, de la industria, de la producción de energía Hidroeléctrica y de la innovación de la producción de biofuel, se estima un incremento del 70% - 90% en la demanda de agua solo en el sector Agrario (Water in a changing World, 2009). Sin embargo, este crecimiento contribuye al aumento de la contaminación de las aguas superficiales (ríos y lagos) debido a los efluentes urbanos, industriales, agrarios, etc., limitando y reduciendo así las reservas de agua disponible para uso humano.

1.2 Agricultura en Ambiente Controlado

1.2.1 Invernadero

Un invernadero es un sistema agrícola especializado, con una estructura de cubierta y paredes, generalmente de vidrio o plástico capaces de proporcionar un ambiente de condiciones controladas muy favorables para el desarrollo de muchos cultivos hortofrutícolas (Figura 2). Su estructura transparente ayuda a dejar pasar toda la radiación solar posible, y su capacidad aislante permite mantener un ambiente herméticamente cerrado, conservando así el calor y transpiración de los cultivos dentro del invernadero; a su vez proporciona un aislamiento de plagas y malas hierbas.

En los invernaderos de plástico los materiales más usados son diferentes clases de polímeros, Polietileno, Policarbonato y Poly (metil metacrilato) usualmente llamado de



vidrio acrílico. Estos materiales tienen la capacidad de dispersar la luz evitando sombras en su interior (Figura 2).

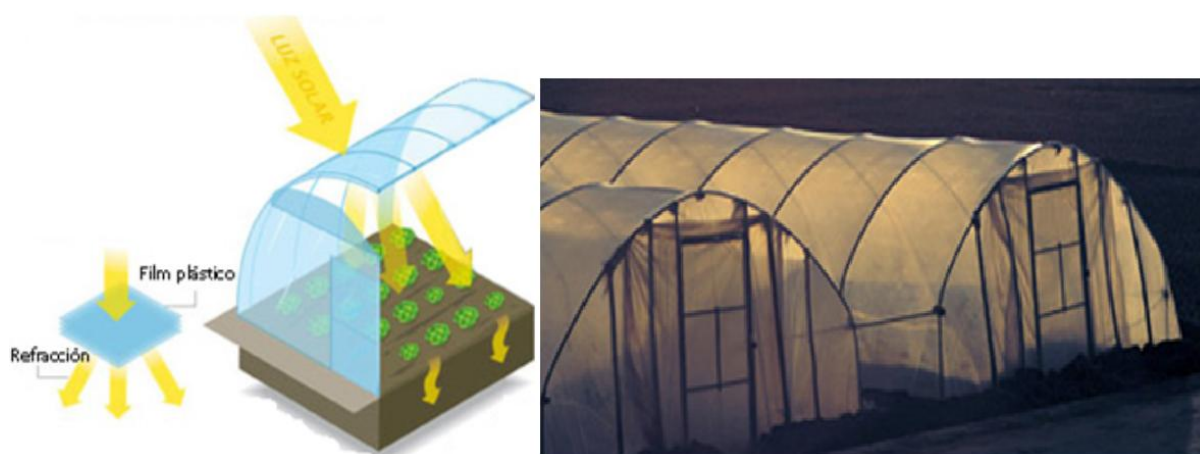


Figura 2 – Dibujo e imagen de un invernadero. Adaptado de (Inverdaderos, 2006)

Un invernadero puede ser formado únicamente por una estructura generalmente metálica y un film plástico (tipo tóner). Puede llevar incorporados una serie de sensores que miden los parámetros físicos y/o biológicos, y una serie de ...de los valores registrados por los sensores hegar intervenir en los diferentes dispositivos de control del ambiente bajo invernadero (apertura de ventanas, aerotermo, jog-system, etc). sencillo o tener tecnología moderna, pudiendo estar acoplado a sensores y ordenadores que ayudan a tener un control casi total sobre todas las variables del ambiente climático, radiación solar, temperatura, humedad, viento, composición atmosférica, transpiración del cultivo y suelo, claves para alcanzar mayor productividad y calidad de un cultivo. Mediante estas técnicas de ambiente controlado en un invernadero se permite alterar los ciclos convencionales, ampliar la temporada de un cultivo o inclusive mantener un cultivo todo el año, no siendo dependiente de las estaciones meteorológicas del año o afectado por las adversidades del clima (frio, granizo, viento, exceso de radiación solar, exceso de precipitación, etc.).

1.2.2 Objetivos del Cultivo en Ambiente Controlado

Esencialmente el cultivo en Ambiente Controlado tiene el propósito de transformar el ambiente Natural consiguiendo ampliar la producción, perfeccionar la calidad, prolongar los periodos de colecta de un cultivo, logrando así una óptima productividad,



fundamentado en el uso de diversas técnicas. Básicamente los objetivos del cultivo en invernadero son (Wittwer & Castilla, 1995) en:

- Reducir las necesidades de agua. La estructura del invernadero permite limitar la radiación solar ayudando a reducir las necesidades hídricas del cultivo y hacer un uso más eficiente del agua de riego, ahorrando agua.

- Limitar el impacto de climas áridos y desérticos y reducir la radiación solar excesiva. En invernaderos, el aislamiento del medio exterior permite criar un microclima apto para el cultivo agrícola. Generalmente la temperatura mínima requerida para un cultivo en invernadero es de 10°C a 15°C, mientras que 30°C es la temperatura máxima suportada por un cultivo. La aplicación de sombreado es una práctica común cuando hay que proteger un cultivo de un exceso de radiación solar.

- Reducir la velocidad del viento. La estructura de un invernadero protege el cultivo de velocidades perjudiciales.

- Reducir daños de plagas, enfermedades, nematodos, malas hierbas, pájaros y otros predadores. El invernadero proporciona un ambiente aislado que favorece la defensa fitosanitaria.

- El control climático permite optimizar la productividad y calidad del cultivo. El invernadero proporciona un control climático y un uso más eficiente de recursos (suelo, agua, luz, CO₂, etc.) obteniendo una mayor producción y calidad, así como la disponibilidad del cultivo fuera de la época tradicional de consumo.

1.2.3 Riego en Invernadero

En una producción agrícola, el agua es el factor más importante, su ausencia (sequia) induce a pérdidas enormes en producción y calidad de un cultivo. El riego es la manera más antigua de prevención de la sequia, y hoy día el agua disponible para riego es cada vez menor.



1.2.3.1 Sistemas de Riego

‘Cualquier sistema de riego debe de tener como principal objetivo suministrar a la planta el agua necesaria, de acuerdo con el conjunto suelo-planta, sin provocar arrastre de fertilizantes’ (Marmól, 2008)

Cualquier tipo de sistema de riego tiene el mismo objetivo, el transporte del agua desde su fuente hasta el cultivo. Existen varios sistemas de riego: surcos (infiltración), a manta, por inundación, por aspersión, por exudación, por goteo, etc. No obstante los sistemas de riego manta, inundación o por surcos tradicionalmente utilizados en invernaderos están en desuso, y los de aspersión (en alto) empiezan a disminuir (Castilla, 2007).

Son los sistemas de riego localizado de alta frecuencia por goteo o exudación, los que se aplican hoy día en invernaderos. La técnica de riego por goteo, desarrollada en los últimos 30 años, es un sistema en el que no hay desperdicio del agua, ya que sus pérdidas de agua son mínimas. Su sistema por presión consiste en suministrar agua y fertilizantes a la planta gota a gota originando un bulbo húmedo en la zona cercana a las raíces, proporcionando de un modo preciso y continuo justamente los nutrientes y humedad necesarios, para que su asimilación se desarrolle con el mínimo consumo de energía (Marmól, 2008).

El sistema de riego localizado por goteo está constituido por un cabezal de riego y abonado; una red de distribución (tuberías principales y derivadas, ramales de riego y emisores o difusores); y elementos de control, regulación y seguridad.

El cabezal de riego está compuesto por un grupo de mecanismos:

- Sistema de bomba de aspiración e impulsión;
- Sistema de filtrado, compuesto por un conjunto de filtros que pueden ser de arena, de malla, de discos, etc. Su función es evitar la obstrucción física de los goteros.
- Sistema de fertilización para abonar el agua de riego, constituido por abonadoras o tanques de fertilización y bombas dosificadoras o inyectoros venturi. Pueden tener como complemento sensores de pH y conductividad eléctrica.

En la red de distribución, el agua del riego con la dosis de fertilizantes viaja desde el cabezal de riego por las tuberías principales y derivadas normalmente fabricadas por



material plástico (PVC o polietileno) hasta los ramales de riego laterales terminando en los goteros (emisores).

Elementos de control, regulación y seguridad, instalados en el cabezal de riego y también en la red de distribución, controlan, regulan y previenen a la instalación de problemas en su funcionamiento como exceso de aire y presión. Los elementos más comunes son, los manómetros, reguladores de presión, purgadores, válvulas volumétricas y de seguridad,

1.2.3.2 *Calidad del agua para Riego*

No hace mucho tiempo, los criterios principales para evaluar la calidad del agua para riego, eran su salinidad y toxicidad de ciertos iones disueltos en el agua. En la actualidad los criterios de evaluación tienden más a un estudio global de todo el ecosistema afectado por el regadío: por los daños que la salinidad causa al cultivo y suelo; por sus efectos sobre la infiltración del agua en el suelo; por los daños originados por la toxicidad de iones boro, cloruro y sodio; por su contenido de nutrientes y elementos sólidos, su riesgo de precipitación y obturación de los goteros (Marmól, 2008).

Los parámetros más comunes para clasificar la calidad y aptitud de las aguas para el riego son la Conductividad Eléctrica (CE), que es función de los iones disueltos e ilustra el contenido de sales (salinidad) del agua, y el índice de Relación de la Adsorción de Sodio (RAS) que cuantifica su alcalinidad. El análisis conjunto de los parámetros de la CE y del RAS proporciona información que permite clasificar un determinado tipo de agua (Anexo 1).

El agua de buena calidad considerada apta para riego tiene el potencial para permitir una producción máxima, siempre que se empleen prácticas acertadas en su manejo. Un agua de mala calidad, poco o nada apta para el riego, podrá dañar el suelo y el cultivo, provocando la disminución del rendimiento de un cultivo. En el caso de la necesidad de emplear agua de mala calidad (valores altos de C.E. y RAS), la acumulación excesiva de sales en el suelo deberá ser evitada mediante la adición de una cantidad de agua adicional, que se denomina fracción de lavado. En la Tabla 1 se puede observar los valores de la máxima C.E. del agua para riego (CEi) que soportan cada cultivo sin que se produzcan reducciones en la producción.



Tabla 1 - Valores de la mínima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reducen la cosecha a cero (MaxCEe) y valores de la máxima conductividad del agua para riego (CEi) que toleran cada cultivo sin que se reduzcan los rendimientos.

Cultivo	MaxCEe (dS/m)	CEi (dS/m)
Judía	6.5	0.7
Melón	16.0	1.5
Tomate	12.5	1.7
Pimiento	8.5	1.0
Pepino	10.0	1.7

Hay que tener también en cuenta la composición química y física del agua para riego: la composición química nos permite tener una evaluación del pH, salinidad, contenido de iones tóxicos e inter-relaciones de sodio, calcio y magnesio; en cuanto a la composición física, posibilita una evaluación de la existencia de partículas inorgánicas (tierra y otros residuos) y orgánicas (insectos, restos vegetales, etc.).

1.2.3.3 Fuentes de Agua para Riego

La creciente disminución de las reservas de agua disponible para uso humano y la creciente demanda de ésta para otros fines, como la industria, el consumo humano y domestico contribuyen a una limitación, cada vez mayor del agua disponible para riego. En muchos casos, la solución es recurrir a otras fuentes de agua de menor calidad: agua de efluentes agrícolas, agua de efluentes urbanos reciclados y agua subterránea salada.

El uso de agua de menor calidad puede reducir las producciones y calidad del cultivo, así como salinizar a la larga el suelo, los acuíferos y el ambiente cercano al local del riego (Chabi, 2003). El suministro de agua salada a través del riego deteriora el suelo, afectando las próximas generaciones de cultivos o vuelve a los acuíferos, deteriorando aún más estos (Tanji & Enos, 1994). Cuando es posible una mezcla de agua de menor calidad con una de mejor calidad ayuda a prevenir/disminuir el impacto de estos problemas, que pueden no ser fácilmente recuperables.

En algunas regiones del litoral Mediterráneo la sobreexplotación de los acuíferos ha causado la intrusión marina en las aguas subterráneas. Esto es un problema real, ya que no



sólo saliniza las aguas empleadas para riego, sino que también contribuye a la acumulación de sales en el suelo (Marmól, 2008).

1.2.3.4 Consumo de agua para riego en Cultivos de Ambiente Controlado

Para un mismo cultivo en condiciones iguales de desarrollo, el consumo de agua es superior en primavera que en invierno. Esta situación se debe al hecho de que el consumo de agua se ve afectado por las condiciones ambientales de radiación solar y temperatura. En primavera, la radiación solar es mayor, y consecuentemente la evapotranspiración también es mayor, por lo que hay una mayor necesidad de reponer el agua perdida en este proceso.

La evapotranspiración es un fenómeno que tiene como base el paso de agua del estado líquido a gaseoso; para ello se requiere una fuente de energía que es la radiación solar. Asimismo, es necesario que haya una diferencia de presión de vapor entre la superficie evaporante y el aire que la rodea (Fernández, y otros, 2006).

La temperatura y la humedad influyen en el déficit de presión de vapor. Humedades altas, próximas a saturación, pueden disminuir la evapotranspiración e inhibir la absorción de nutrientes, particularmente el calcio, así como acarrear problemas de enfermedades (Garzoli, 1989).

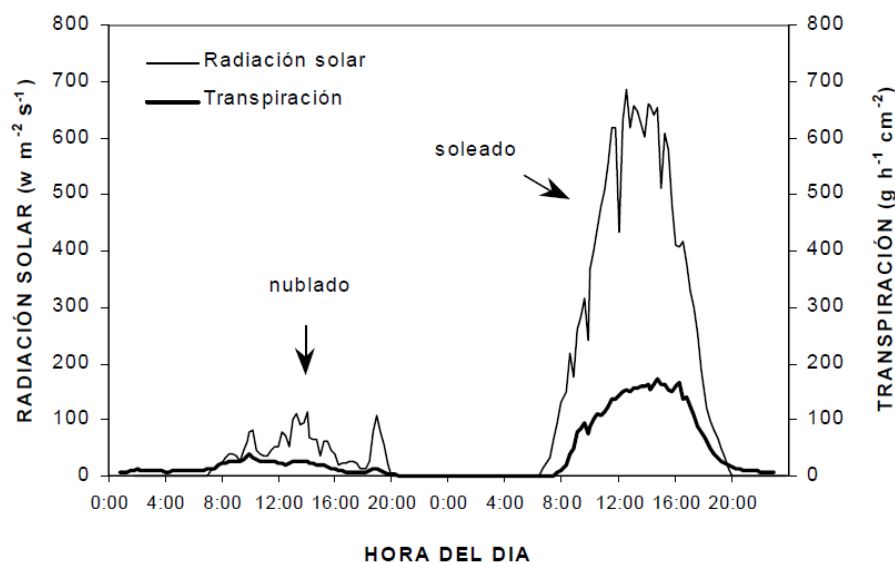


Figura 3 - Evolución a lo largo de un día nublado y un día soleado de la radiación solar y la transpiración de un cultivo de melón bajo invernadero (Fernández, y otros, 2006).



En la Figura 3 se puede observar la alta sensibilidad de la transpiración a las variaciones de radiación, ya que la transpiración depende de las oscilaciones de la radiación, reduciéndose drásticamente en un día nublado respecto a un día soleado.

En la Tabla 1 se pueden observar las necesidades de riego mediante la presentación de los consumos medios de agua para los principales cultivos hortícolas bajo invernadero, realizados en suelo enarenado y en condiciones de no encalado o blanqueo, para distintas fechas de siembra o trasplante.

Tabla 2 - Necesidades de riego para cultivos bajo invernadero en Almería (l/m²/día) (Fernández, y otros, 2006).

	Verano	Invierno-Primavera
Pepino	0,6-3	0,6-1,6
Berenjena	0,7-2,3	0,7-2,7
Calabacín	0,6-3	0,7-1,8
Pimiento	0,7-4,3	0,8-2,7
Tomate	0,7-3,5	1-3

1.3 Desaladora Térmica usando la Energía Solar (Destilador Solar)

1.3.1 Energía solar

‘La energía solar es una de las grandes esperanzas para resolver el problema energético mundial. Está claro que es una energía inagotable, que sólo con la radiación del sol tendríamos energía abundante, de calidad y a buen precio si fuéramos capaces de convertirla para usos diarios.’ (Rosell, 2007)

El Sol es el mayor objeto de nuestro sistema solar y, como tal, es el objeto central y dominante del sistema planetario solar. Es una estrella en que su masa está compuesta mayoritariamente por 75% de hidrogeno y 25% de helio, y en su núcleo ocurren continuas reacciones nucleares que liberan energía que es irradiada y llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética.

Mediante la radiación de su energía electromagnética, contribuye directa o indirectamente para que exista vida en la Tierra, porque todo el alimento y el combustible procede en



última instancia de las plantas que utilizan la energía de la luz del Sol y por tanto toda la manifestación de vida no existiría sin la presencia del sol y su calor.

El Sol emite sobre nuestro planeta una media de 174 PW (petawatts= 10^{15} watts) de radiación solar por segundo (Smil, 1991). Se estima que en 40 minutos de insolación, nuestro planeta recibe más energía que la energía que consume en un año toda la población mundial actual (6 billones)(Solar Computer House, 2008).

La cantidad de energía emitida por el sol en forma de radiación solar que llega a la superficie externa de la atmosfera terrestre se denomina constante solar, y tiene el valor de 1.368 W/m^2 aproximadamente. Es una constante que ha sido medida con bastante precisión por satélites meteorológicos y puede sufrir una pequeña variación del 3,5% dependiendo de la actividad solar y principalmente de la órbita terrestre, llegando a un máximo de 1.410 W/m^2 en Enero y a un mínimo de 1.320 W/m^2 en Julio, que es cuando la Tierra está más cerca y mas lejos del Sol correspondientemente.

De la constante solar se puede calcular el flujo medio que incide por metro cuadrado en la superficie esférica exterior de la atmósfera, ya que es la cuarta parte de ese valor: unos 342 W/m^2 . A este valor, le restamos un 30 % (102 W/m^2) que es reflejado desde la propia atmósfera o desde la superficie terrestre (continental/oceánica), e irradiado de nuevo al espacio extraterrestre.

La potencia absorbida por la Tierra queda, por lo tanto, en 240 W/m^2 aproximadamente. De ellos, 70 W/m^2 son absorbidos directamente por los gases y las nubes que componen la atmósfera: una pequeña parte es absorbida en la estratosfera, especialmente por el oxígeno y el ozono, y la mayor parte es absorbida en la troposfera (los 10 primeros kilómetros de la atmósfera aproximadamente), especialmente por el vapor de agua, por el polvo en suspensión y por las nubes. Los 170 W/m^2 restantes, que atraviesan el aire, son absorbidos por la superficie terrestre, repartiéndose de forma muy diferente según la latitud(Uriarte, 2008).

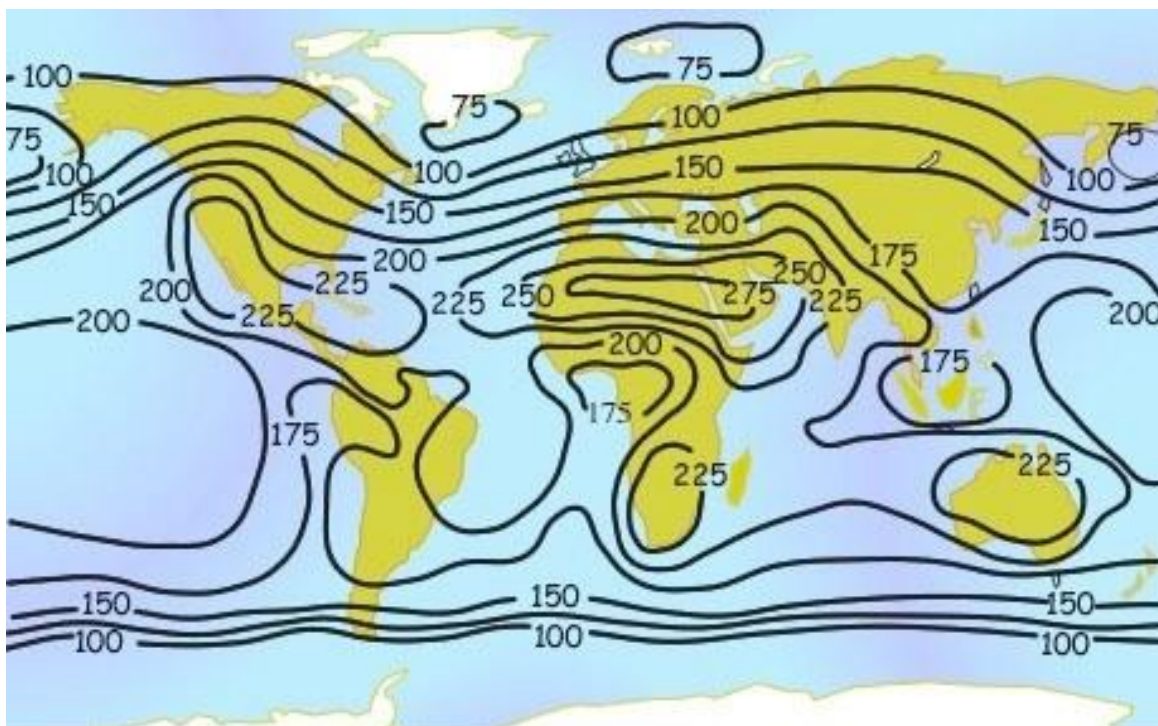


Figura 4 - Radiación solar media recibida en superficie, expresada en W/m^2 . Oscila entre un máximo de unos 275 W/m^2 en las regiones despejadas de nubosidad del Sahara y Arabia, hasta un mínimo de 75 W/m^2 en las islas brumosas del Ártico. (Fuente: Uriarte, 2008).

En el último siglo se han realizado muchos estudios y trabajos de investigación con el objetivo de mejorar la eficiencia del empleo de energía solar, pero, solo a partir de la crisis del petróleo de 1970 algunos países desarrollados empezaron a formular estudios e investigaciones de importancia para el aprovechamiento de la energía solar. La energía solar puede ser convertida en otras formas de energía, como calor y electricidad. Se logra convertir la luz solar en energía eléctrica de un modo directo (energía fotovoltaica) o indirecto (plantas de energía solar térmica de altas temperaturas), por otro lado la conversión a energía térmica básica es más sencilla.

España es uno de los Países de Europa con mayor distribución de radiación solar y cantidad de horas de Sol (Figura 5), lo que le convierte en uno de los mejores candidatos a aprovechar su uso en Europa.

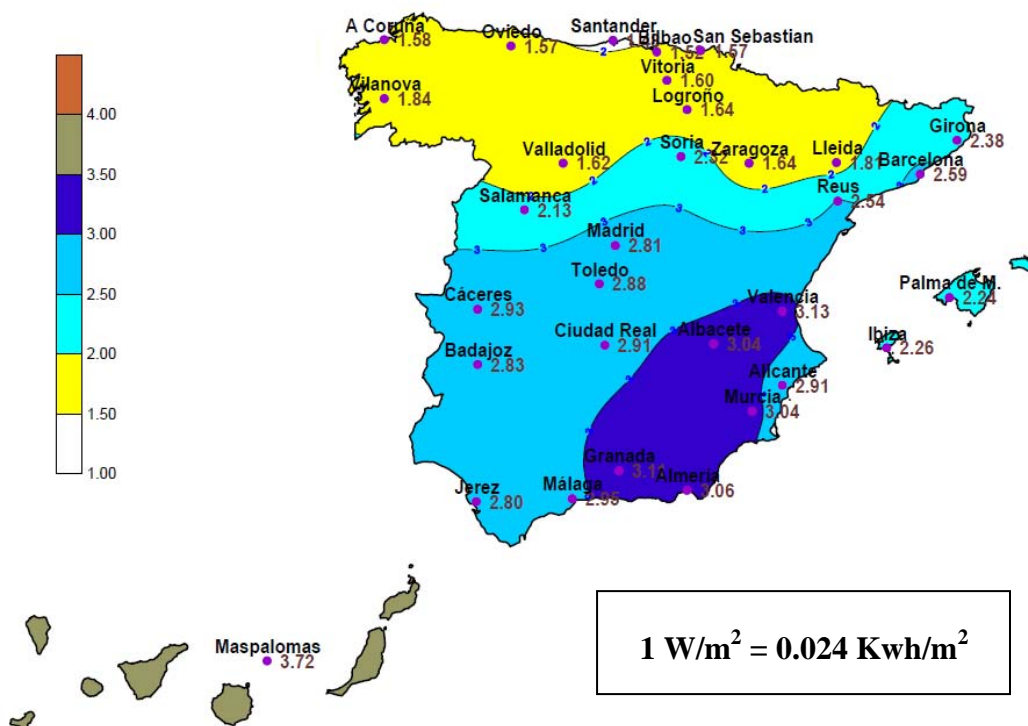


Figura 5 - Distribución de la Irradiación Global Media en España, Enero de 2005 (Kwh/m²).

(Fuente: Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente, 2005).

La energía solar es ilimitada y gratuita, y en su gran mayoría limpia para el planeta.

1.3.2 Destilador Solar

Un destilador solar tiene el mismo principio de la formación de la lluvia: evaporación del agua y condensación de la misma. Se trata de una estructura para desalinizar o purificar un determinado tipo de agua usando la energía solar, con el objetivo de obtener agua destilada pura.

Su funcionamiento y estructura son muy simples, una cubeta de color negro para absorber la energía solar, que contiene una pequeña lamina de agua salada o impura, y una cubierta de plano inclinado de vidrio o plástico transparente herméticamente cerrada con la cubeta. La radiación solar es absorbida por el color negro de la cubeta, calentando el agua y provocando su evaporación. El contenido en vapor de agua así como la temperatura en el interior del destilador son elevados. Cuando la temperatura de las paredes del destilador alcanza el punto de rocío, el vapor de agua contenido en el aire al entrar en contacto con las paredes más frías de la cubierta empieza a condensar, fluyendo por el plano inclinado



hasta un recipiente colector (Figura 6). La sal y las sustancias contaminantes no volátiles se quedan en la cubeta.

El funcionamiento de un destilador solar está regido por las transferencias de masa y energía que ocurren en su interior. Las transferencias de masa y energía en el interior del destilado han sido demostradas por Baum y Bairamov en 1964. Estos autores probaron que el núcleo del aire en el centro del destilador es esencialmente isotérmico, ocurriendo las transferencias de masa y calor en la capa-limite de pocos milímetros próxima a la superficie del agua y de las paredes de cristal del destilador.

Las variables más importantes para la producción del agua destilada son: intensidad del sol, profundidad del agua, concentración de sales o impurezas, temperatura del ambiente interior y exterior, velocidad del viento, área del colector (Mamlook & Badran, 2007).

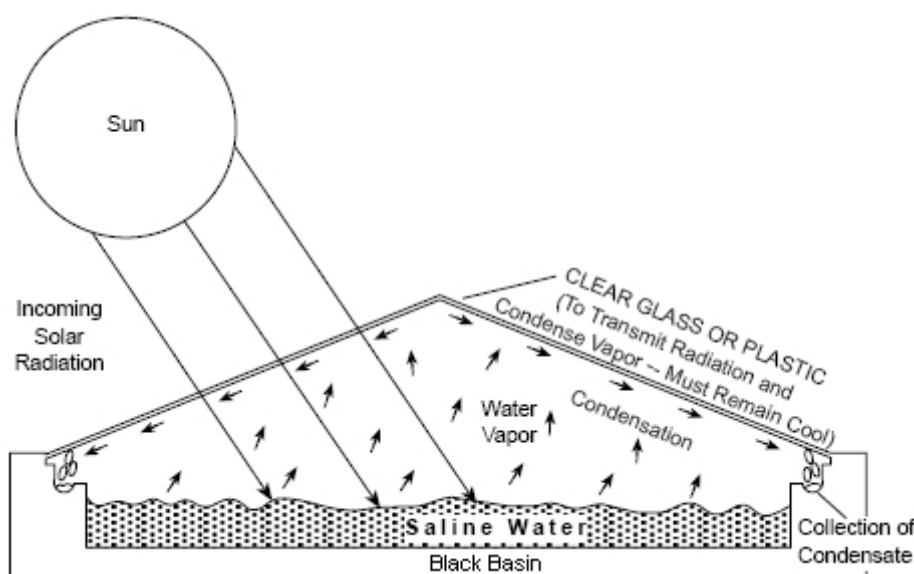


Figura 6 - Destilador solar básico, adaptado de: Bueros, (2000)



1.3.2.1 Efectos de las Condiciones Climáticas

RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es el parámetro que más afecta la productividad de un destilador solar y consecuentemente el más importante. Es la variable que comanda el proceso de destilación. La fracción de radiación solar disponible esta dependiente de las condiciones climáticas, de la posición geográfica y del diseño del destilador solar. Cappeletti (2002) ha concluido que un destilador solar convencional tiene la capacidad de producir aproximadamente entre 5 l/m²/d (en un día abierto de verano) y 2 l/m²/d (en un día de invierno).

TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR Y EXTERIOR

La temperatura del ambiente interior es directamente proporcional a la producción de destilado. Una relación entre la producción de destilado y la temperatura interior del destilador indica que la productividad aumenta un 5% por cada aumento de 5,5°C (Parker, 1991). Morse y Read (1968) han demostrado que un aumento de 26,7 para 37,8°C en la temperatura ha proporcionado un aumento de 11% en la productividad y sin embargo una disminución de 26,7 para 15,6°C en la temperatura ha provocado un descenso de 14% en la productividad del destilador solar. Mamlook y Badran (2006) también han llegado a resultados similares ya que en su estudio de evaluación de los parámetros que afectan un destilador solar en Amman (Jordania), han conseguido un aumento de producción de destilado en 15%, aumentando la temperatura del ambiente del destilador solar de 24.5°C a 29°C.

VELOCIDAD DEL VIENTO

El efecto del viento ha sido estudiado por diversos investigadores como Cooper (1969), Dimri et al. (2008), Al-Hinai et al. (2002), estos han descubierto que la velocidad del viento es un factor importante para el aumento de la condensación. Cuando la velocidad del viento aumenta, aumenta el coeficiente de convección de transporte de calor del vidrio/material de la cubierta para el ambiente exterior. Esto provoca que la temperatura de la cubierta disminuya por lo que aumenta la diferencia de temperaturas entre el aire del invernadero y la cubierta, aumentando a si el surgimiento de condensación. Al-Hinai et al. (2002) ha estimado que el aumento de la velocidad del viento de 1 m.s⁻¹ a 3 m.s⁻¹ aumenta la producción del destilado en 8%. Sin embargo para Cooper (1969) demostró que



velocidades del viento de $2,15$ a $8,8 \text{ m.s}^{-1}$ produce un aumento de la productividad en solo un $1,5\%$.

1.3.2.2 Efectos de los Parámetros del Diseño del destilador solar

La primera planta de destiladores solares convencional ha sido proyectada y construida en 1872 por Charles Wilson en el Norte del Chile. Mediante condiciones atmosféricas favorables (cielo limpio) y una área de $4,700 \text{ m}^2$ lograba una producción de $23 \text{ m}^2/\text{d}$ (Chabi, 2000). Desde entonces muchos destiladores solares con el mismo principio han sido creados y estudiados mediante varias y distintas alteraciones y adiciones: en el diseño geométrico, en el tipo de materiales utilizados tanto como absorbente como para cubierta, técnicas de construcción, y procedimientos de operación. En 1995, Delyannis y Belessiotis (1995) estimaran que un destilador solar básico tiene 20 años de vida y logra una producción media de $4 \text{ l/m}^2/\text{d}$.

PROFUNDIDAD DEL AGUA

La profundidad del agua en las cubetas de un destilador solar tiene un efecto significativo en la productividad de destilado de este, siendo la profundidad inversamente proporcional a la productividad. Esta relación existe porque al disminuir la profundidad del agua se disminuí su volumen, y consecuentemente su capacidad térmica o que permite que el proceso de destilación se inicie más temprano. Mamlook y Badran (2006) han calculado que una disminución en la profundidad del agua en las cubetas de $3,5\text{cm}$ para 2cm produce un aumento de $25,7\%$ en la productividad de destilado.

MATERIAL Y ANGULO DE LA CUBIERTA

El vidrio es el mejor material para la cubierta de un destilador solar, ya que proporciona una mayor transmitencia de la radiación para distintos ángulos de incidencia. La transferencia de calor a través de la cubierta aumenta con la disminución de la espesura de esta. Abdulrahman y Arif (1997) han obtenido un $16,5\%$ más en la producción de destilado usando un vidrio de 3mm en comparación con un vidrio de 6mm de grosor.

Para minimizar la fracción de radiación reflejada por la cubierta del destilador conviene minimizar el ángulo de la cubierta. Un experimento realizado por Meukam et al. demostró



que un ángulo de 16° de la cubierta permite una buena transmisión de la radiación solar y asegura que las gotas no caigan de vuelta a la cubeta del destilador.

MATERIAL Y COLOR DE LAS CUBETAS

El material de las cubetas debe tener las siguientes características: (i) máxima absorbencia de la radiación solar incidente; (ii) impermeabilidad al agua y sales; (iii) tener un largo periodo de duración; (iv) resistencia a altas temperaturas y radiación, esencialmente la ultra-violeta; (v) resistencia física. El color con mejor absorbencia es el negro, pero sin embargo en otros casos se puede recoger a la adición de colorantes en el agua como sustancia absorbente.

Akash et al.(1998) ha estudiado el efecto de la aplicación en el agua de colorante negro y tinta negra como sustancia absorbente, lo que ha supuesto un aumento en la producción del destilado en 60% y 45% respectivamente. Nijmeh et al. (2005) probó que la aplicación de permanganato potásico, dicromato potásico y colorante violeta al agua como sustancia absorbente aumenta la producción de destilado en un 17%, 26% y 29% respectivamente.

Los destiladores solares, son sin duda una de las mejores soluciones para el problema de demanda de agua en zonas áridas y con estrés hídrico, su manutención y operación puede ser sencilla y de bajo coste, en contrapartida se necesitan amplias áreas de instalación y puede suponer una inversión inicial elevada (Chabi, 2000).

1.4 Destilador solar integrado en un invernadero

‘El agua producida por un destilador solar es menor que el agua necesaria para el riego de un cultivo al aire libre, pero es posible que sea adecuado para proporcionar agua limpia, para el cultivo en ambiente controlado’ (Chabi, 2000).

El concepto de un destilador solar integrado en la estructura de un invernadero ha sido desarrollado por primera vez en 1961 por Tombe y Foex, y una década más tarde analizado teóricamente por Oztoker y Selcuk (1971). A lo largo de los años, la combinación de destilador solar con invernadero ha continuado siendo estudiada, mediante la creación de modelos teóricos y experimentales que simulan el comportamiento, analizan las variables y parámetros, así como la eficiencia en la producción de destilado conforme a los diferentes diseños del destilador y forma de integración en el invernadero.



El sistema consiste en tener un destilador solar integrado en la parte superior de un invernadero. La cubeta del destilador ha de estar constituida por un material trasparente con características absorbentes, con el objetivo de dejar pasar la radiación solar que no es absorbida por la cubeta, para que pueda llegar al cultivo (Figura 7). El destilador está herméticamente cerrado para que no haya pérdidas de humedad y calor hace el cultivo, su condensación es recogida a través de colectores en los extremos de la cubierta del invernadero.

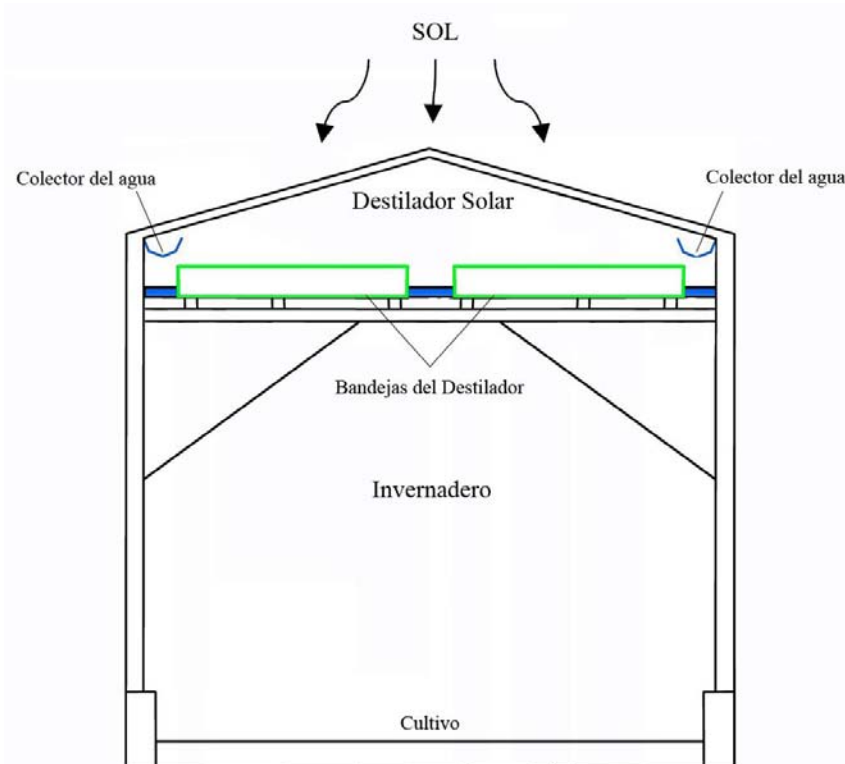


Figura 7 - Esquema de un destilador solar integrado en un invernadero.

Estudios realizados usando diversos materiales de cubierta y una lamina de agua de 5 cm en la cubeta del destilador integrado en la parte superior del invernadero han demostrado que 91% de la radiación solar atraviesa la cubierta exterior, de la cual 5% es reflejada por la lamina del agua, 40% es absorbida por la cubeta y 55% alcanza el cultivo (Chabi, 2000).

Esta combinación del destilador solar con el invernadero tiene ventajas y limitaciones (Tabla 3), y no obtiene el mismo valor de eficiencia de producción que se obtiene con los mismos sistemas en separado, tanto del destilado como del cultivo (Selcuk & Tran, 1975). A pesar de esto en los últimos 30 años diversos estudios realizados, cambiando el diseño y



perfeccionando la obtención del destilado han logrado alcanzar una producción desde $1\text{l/m}^2/\text{d}$ hasta $2-3.5\text{l/m}^2/\text{d}$ (Chabi, 2000).

Srivastava et al.(2000) y Chabi (2000) en sus estudios han concluido con sus resultados, que el ángulo de la cubierta tiene una influencia significativa en la producción del destilado y que un destilador integrado en un invernadero es una solución viable para provenir el agua necesaria para irrigación de ciertos cultivos. Chabi ha estimado que la producción de destilado llega y traspasa (en algunos periodos) la evapotranspiración de las plantas en ambiente controlado. Su estimación de producción de destilado ha sido de $1-1.6\text{l/m}^2/\text{d}$.

Chabi y Jilar (2004) han concluido que un destilador solar integrado en un invernadero, tiene la capacidad para cubrir la demanda del agua de un cultivo como la lechuga utilizando la técnica de mezclar el destilado con el agua salobre (50%-50%).

Tabla 3- Ventajas y limitaciones del destilador solar integrado en un invernadero.

Destilador solar integrado en un invernadero(Chabi, 2003)	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">-Un cultivo en ambiente controlado tiene oscilaciones diurnas y estacionales en función de las necesidades de riego, así como la variación de la producción de un destilador solar, ambos oscilan con la radiación solar.-El destilador solar integrado en un invernadero facilita el transporte de agua al cultivo.-En zonas áridas un destilador solar reduce la radiación solar excesiva, que puede dañar cultivos sensibles a altos valores de radiación solar.
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none">-Las oscilaciones de la producción de destilado, pueden no ser compatibles con las oscilaciones de la necesidad del riego de un cultivo.-La acumulación de la sal y/o materia inerte en la cubeta de destilado disminuye la transmisión de radiación solar para el cultivo.-En caso de cultivos que no necesitan de sombreado, la cubeta y lamina de agua del destilador solar, disminuirá la transmisión de radiación solar para el cultivo.



1.5 Objetivos

El primer objetivo de este trabajo consiste en el análisis del comportamiento y rendimiento de un destilador integrado en un invernadero, para ello se ha recurrido al análisis separado y conjunto de cada una de las variables existentes en el sistema. Con el propósito de conseguir elaciones sobre cada una de las variables y su relación entre ellas. Con el fin de evaluar y mejorar el rendimiento del sistema, proporcionando así una solución para la creciente limitación de agua para riego.

El segundo objetivo es encontrar un modelo teórico de simulación del destilado producido, así como de la duración del período de destilación para el sistema.

El tercer objetivo es evaluar la viabilidad de aplicación del destilado obtenido para el riego de cultivos (pepino, tomate y pimiento) bajo invernadero.



2 MATERIAL Y METODOLOGÍA

2.1 Descripción del Sistema

El sistema de un destilador solar integrado en un invernadero ha sido construido y analizado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos en la Universidad Politécnica de Valencia, localizada en el este de España. Para este experimento ha sido utilizado un invernadero comercial en el que se integró una estructura de soporte para el destilador solar. Estas modificaciones han sido las mínimas posibles para tratar de minimizar el impacto del destilador sobre las capacidades ópticas y térmicas del invernadero.

El destilador solar ha sido integrado dentro del invernadero en el techo; para ello se ha construido una estructura metálica dentro de este para soportar las cubetas del destilador. La estructura y las cubetas del destilador han sido instaladas solo en una parte del invernadero, habiendo sido fabricadas las cubetas de un material transparente.

Con estas medidas se trata de que la reducción de la Radiación Fotosintética Activa (PAR) que llega al cultivo fuera la mínima posible.

2.1.1 Invernadero

El invernadero era tipo Venlo, de vidrio, con cubierta a dos aguas en cada módulo y techos capilla con una pendiente de 19° sobre el plano horizontal. Su orientación era Sur y sus dimensiones de 7.20 metros de ancho por 8.20 metros de longitud, 5.30 metros de altura total y 4.80 metros de altura hasta los canalones (Figura 8 y Figura 9). La superficie total era de 60 m^2 , siendo la superficie útil ocupada por el destilador de 53 m^2 .

Como métodos de control del clima el invernadero contaba con: (i) un sistema de ventilación forzada mediante tres ventiladores instalados en una de las paredes laterales exteriores; (ii) ventanas de entrada de aire en la pared lateral opuesta; (iii) el encalado parcial de las paredes laterales; (iv) un aerotermo. El sistema de ventilación funcionaba cuando la temperatura dentro del invernadero sobrepasaba los 28°C ; el aerotermo actuaba cuando la temperatura descendía por debajo de los 14°C .

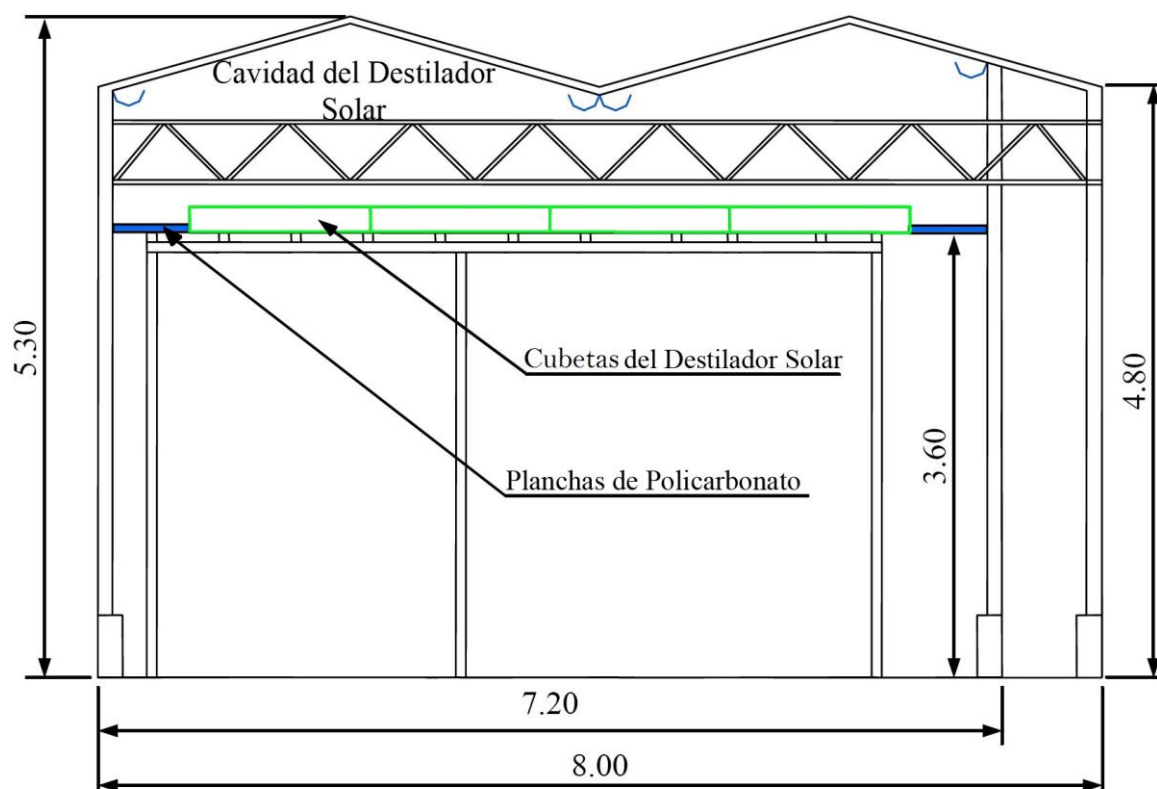


Figura 8 – Dimensiones del invernadero, del destilador, de las cubetas y estructura soporte.



Figura 9 - Foto del invernadero testado



2.1.2 Destilador Solar

El destilador solar, formado por un conjunto de cubetas se encontraba al interior del invernadero ocupando la parte interior del mismo (Figura 10), apoyado sobre una estructura metálica de pórticos y viguetas (Figura 11). La cubierta del invernadero actuaba como superficie de condensación del destilador solar. Las cubetas eran de policarbonato de 4mm de grosor y 1m² de superficie siendo sus dimensiones de 1.40 x 0.70 x 0.15 metros (Figura 12). El recinto del destilador se encontraba aislado de la parte inferior del invernadero mediante planchas de policarbonato, situadas en el plano donde se encontraban las cubetas.



Figura 10 – Foto de la cubierta del destilador.



Figura 11 – Foto de la estructura de apoyo al destilador solar.



Figura 12 – Cubetas de policarbonato aisladas del interior del invernadero.

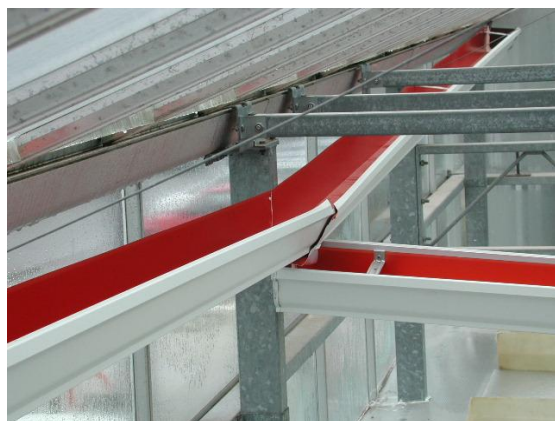


Figura 13 – Canales de aluminio lacado.

Con este aislamiento se trataba de obtener un mayor rendimiento de producción de destilado, reduciendo la superficie de condensación únicamente a la cubierta del invernadero. Para recoger el destilado se instaló un sistema de canales de aluminio lacado que conducían el destilado a un depósito (Figura 13). Las cubetas del destilado se



llenaban con agua procedente de la red, mediante una serie de tuberías de polietileno que desembocaban en unos orificios instalados en la base de cada cubeta. El que se suministraba de manera uniforme en cada cubeta hasta obtener una lámina de 5 cm de espesor (Figura 15). Estas tuberías y orificios también se utilizaban para vaciar las cubetas cuando hacía falta.



Figura 14 – Condensación.



Figura 15 – Sistema de suministro del agua.

2.1.3 Sistemas de Medición y Adquisición de datos

2.1.3.1 Medición y adquisición de las variables climáticas

Para controlar y registrar todas las variables de los parámetros climáticos durante las experiencias, se instalaran varios sensores de temperatura, humedad y radiación solar (Tabla 4), en la sección del destilador solar, así como al exterior y al interior del invernadero (Figura 16). Los sensores transmitían la información a un sistema de adquisición de datos y este a un ordenador. Dichos sensores estaban calibrados y sus valores se compararon con datos de otras estaciones meteorológicas instaladas en la Universidad Politécnica de Valencia.

El sistema de adquisición de datos consistía en tres módulos de ocho canales (ICP DAS Co., Ltd) que recogían la información de los sensores y mediante un convertidor que linealizaba y acondicionaba la señal, la transmitían hasta el ordenador (Figura 17 y Figura 18). En el ordenador los datos han sido procesados, monitorizados y analizados con un programa escrito en lenguaje LABVIEW. Con el programa LABVIEW se elaboraron dos



pantallas de visualización de los datos obtenidos, una numérica y otra grafica (Figura 19 y Figura 20).

Las variables se registraron cada minuto y se guardó el valor medio horario en el ordenador (Figura 18). Las variables medidas fueran las siguientes:

- La irradiancia (W/m^2) al exterior y al interior del invernadero, y en la sección del destilador solar, mediante el uso de piranómetros (Kipp & Zonen).
- La radiación PAR ($\mu\text{mol/m}^2.\text{s}$) al exterior y al interior del invernadero, y en la sección del destilador solar, mediante el uso de sensores específicos (Licor Inc.).
- La humedad relativa (%) al exterior y al interior del invernadero mediante el uso de un psicrómetro de bulbo húmedo y seco, y en la sección del destilador solar, mediante un higrómetro (Eliwell Ibérica).
- La temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) al exterior y al interior del invernadero, y en la sección del destilador solar, mediante la instalación de termopares tipo T.
- La temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de la base de las cubetas del destilador, y del agua que contenían estas, mediante el mismo tipo de termopares.
- La temperatura del vidrio de la cubierta dentro y fuera del invernadero ($^{\circ}\text{C}$) mediante termopares.

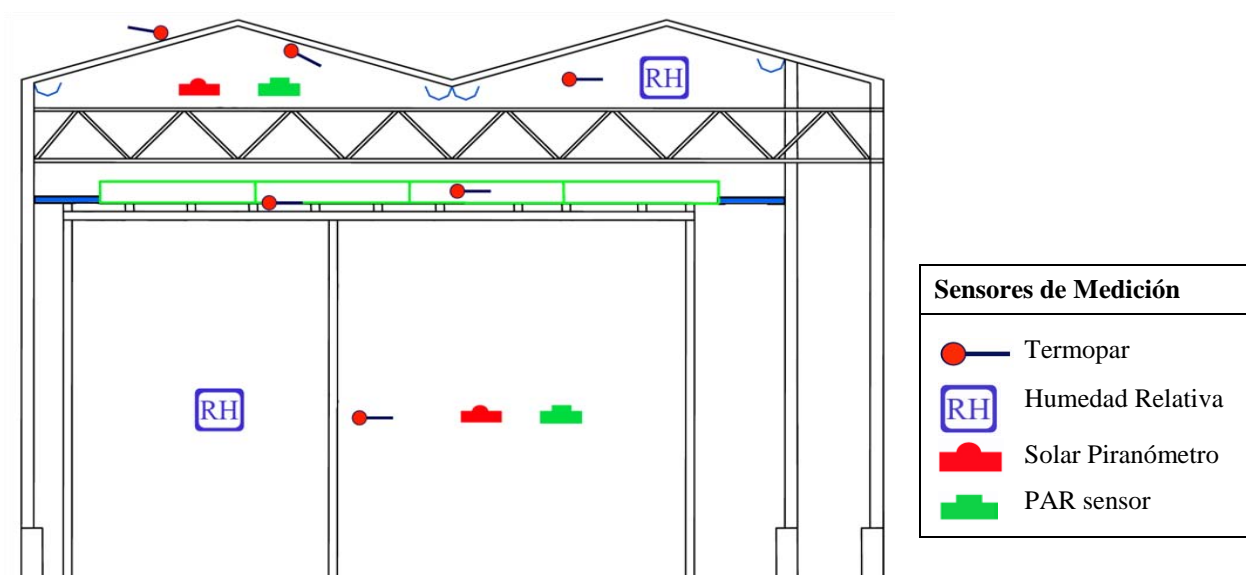


Figura 16- Esquema con la localización de los sensores dentro y fuera del invernadero así como dentro de la sección del destilador solar.



Tabla 4- Características de los Sensores instalados.

SENSOR	MEDIDA	MARCA	TIPO	SEÑAL	CONVERSIÓN	UBICACIÓN
Termopar	Temperatura	-	-	°C	-	INVERNADERO
Piranómetro	Radiación solar	KIPPZONEN	CM-3	mV	1 mV = 50,20 W/m ²	INVERNADERO
Piranómetro	Radicación solar	KIPPZONEN	-	mV	1 mV = 77,60 W/m ²	EXTERIOR
Piranómetro	Radiación solar	MIDDLETON	-	mV	1 mV = 120,69 W/m ²	EXTERIOR
Piranómetro	Radiación solar	HAENI	-	mV	1 mV = 12,83 W/m ²	EXTERIOR
Radiación PAR	Radiación PAR	LI-COR	LI-190SA 28315	mV	1 mV = 243,33 mmol/m ² /s	INVERNADERO
Radiación PAR	Radiación PAR	LI-COR	LI-190SA 28316	mV	1 mV = 238,47 mmol/m ² /s	INVERNADERO
Radiación PAR	Radiación PAR	LI-COR	LI-190SA 28317	mV	1 mV = 236,76 mmol/m ² /s	EXTERIOR
Higrómetro	Humedad relativa	GEONICA	HR 928	V	1 V = 100 %	INVERNADERO



Figura 17- Módulos.



Figura 18- Ordenador.

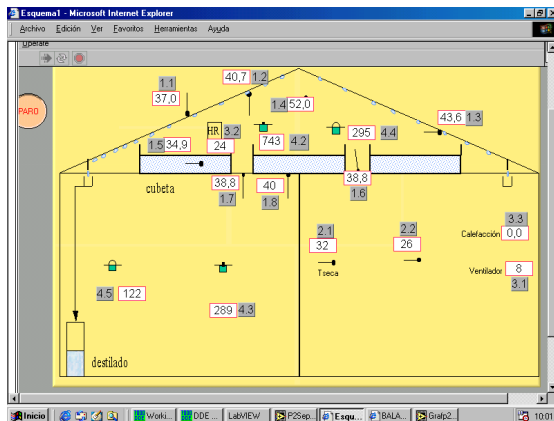


Figura 19 - Aplicación LABVIEW.

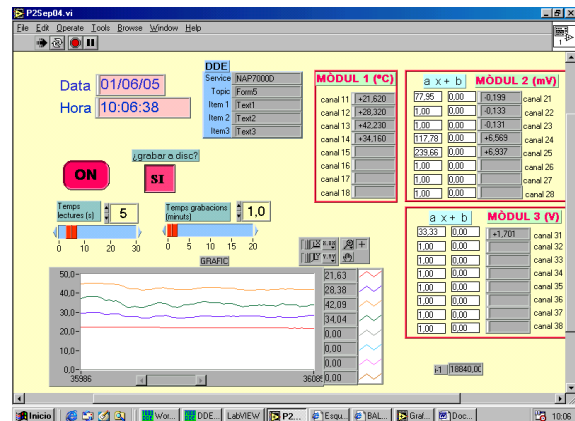


Figura 20 - Aplicación LABVIEW.

2.1.3.2 Medición de la cantidad de destilado producido

El agua condensada en la cubierta fue recogida mediante el sistema de canalones (Figura 14), que conducía el destilado a un depósito situado dentro del invernadero (Figura 21 y Figura 22). Para la medición del destilado producido, se utilizó una balanza electrónica con capacidad máxima de 6.2 kg, (resolución ± 1 g). El sistema de medición del destilado consistía en 2 depósitos cilíndricos conectados por un tubo, un depósito de capacidad de 30 l, tenía la función de recoger el destilado condensado, y el otro depósito, con una capacidad de 1 l, funcionaba como depósito de medición y su peso era registrado en la balanza electrónica. La cantidad de agua acumulada en el depósito de medición fue registrada y guardada cada minuto por el sistema de adquisición de datos.

El valor del agua recogida cada hora, V_T (kg), se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$V_T = [P_s(t) - P_s(t + dt)](1 + \Phi_1^2 / \Phi_2^2)$$

Donde, $P_s(t)$ y $P_s(t+dt)$ (kg), hacen referencia al peso medido en cada espacio temporal, dt (s). Φ_1 y Φ_2 (m) representan los diámetros de cada depósito.



1. Depósito del recogida del destilado
2. Depósito para pesar el destilado
3. Tubería flexible
4. Entrada del agua destilada
5. Balanza electrónica
6. Válvula de salida del agua destilada

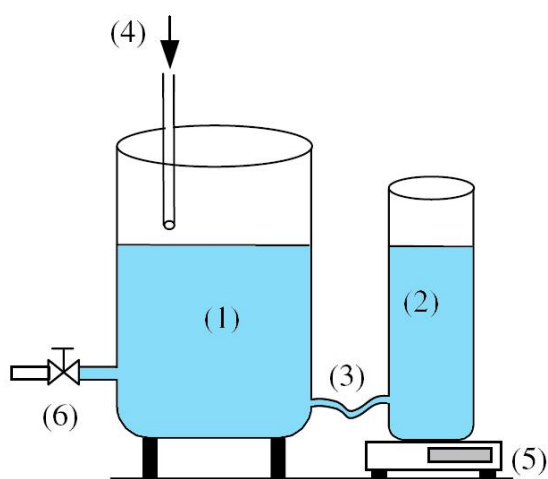


Figura 21- Sistema de medición de la producción del agua destilada



Figura 22- Foto del sistema de medición del destilado.

2.2 Comportamiento del sistema del destilador solar

El comportamiento del destilador solar está caracterizado por las diferentes transferencias de masa y calor que ocurren en su interior. Los dos principales fenómenos que ocurren son la transferencia de calor entre el agua y el cristal del destilador solar; y la transferencia de masa entre el agua y el cristal del destilador solar.

La transferencia de calor ocurre mediante tres distintos mecanismos: (i) por libre convección entre el aire húmedo y el cristal interior del destilador solar; (ii) a través de la transferencia de energía que ocurre en el proceso de evaporación-condensación inherente a la transferencia másica y (iii) por radiación emitida entre las superficies de la lamina de agua y el cristal del destilador.



La transferencia de masa se debe a los procesos físicos de evaporación del agua existente en las cubetas del destilador. El vapor de agua se va incorporando en el aire del interior del destilador aumentando su concentración. La condensación se produce cuando el aire próximo a la cubierta de cristal alcanza la saturación a la temperatura del cristal.

2.2.1 Transferencia Calorífica por Convección entre el agua del destilador y el cristal del destilador solar.

La transferencia del calor por libre convección del aire húmedo dentro del destilador, q_{cw} (W/m^2), entre el agua del destilador y el cristal del destilador solar, es directamente proporcional a la diferencia entre las temperaturas del agua, T_w ($^{\circ}C$) y del cristal, T_g ($^{\circ}C$).

$$q_{cw} = h_{cw}(T_w - T_g)$$

El coeficiente de la transferencia del calor por libre convección, h_{cw} ($W/m^2 K$), es determinado por la relación entre los números adimensionais de Nusselt (Nu), Grashof (Gr) y Prandtl (Pr).

$$Nu = \frac{h_{cw} l}{k_{as}} = C(Gr Pr)^n$$

En que l (m) es la distancia del agua al cristal del destilador, k_{as} ($W/m K$) es la conductividad térmica del air saturado y C depende del número de Grashof (Gr) que traduce la turbulencia del flujo del aire (Malik, Tiwari, Kumar, & Sodha, 1982). Sin embargo, la relación propuesta solo es válida para transferencias de calor por libre convección en superficies horizontales y sin existencia de evaporación. Para un destilador solar donde existen simultáneamente transferencias de masa, es necesario ajustar el Gr con una diferencia de temperatura $\Delta T'$ equivalente, que corrige el Gr para la situación de evaporación no-isotérmica.

$$\Delta T' = \frac{(P_w - P_g)(273 + T_w)}{268.9 \times 10^3 - P_w} + (T_w - T_g)$$

Dunkle, (1961) ha sustituido los valores de los parámetros físicos que ocurren en las variables adimensionales, y nos ha proporcionado las consiguientes fórmulas para el coeficiente y la transferencia de calor por convección libre. Aplicable en todo el rango del funcionamiento normal de un destilador solar convencional.



$$h_{cw} = 0.884 \left[\frac{(P_w - P_g)(273 + T_w)}{268.9 \times 10^3 - P_w} + (T_w - T_g) \right]^{1/3}$$

$$q_{cw} = 0.884 \left[\frac{(P_w - P_g)(273 + T_w)}{268.9 \times 10^3 - P_w} + (T_w - T_g) \right]^{1/3} (T_w - T_g)$$

En que P_w y P_g son las presiones parciales, (Pa), de vapor de agua saturado en el agua y cristal respectivamente.

Para un cálculo aproximado de la presión parcial del vapor de agua en condiciones atmosféricas, en función del rango de temperaturas registradas normalmente en el interior de un destilador solar convencional (10-50°C) (Fernandez & Chargoy, 1990):

$$P = e^{(25,317 - 5144/T)}$$

2.2.2 Transferencia Másica y Calorífica por evaporación entre el agua y el cristal del destilador solar

La transferencia del calor, q_{ew} (W/m²), de la superficie del cristal del invernadero para con la superficie del agua del destilador mediante evaporación se calcula multiplicando la cantidad de masa transferida, m_w (kg/m²), por el coeficiente del calor latente del vapor del agua, λ (J/kg) :

$$q_{ew} = m_w \lambda$$

La transferencia del calor q_{ew} (W/m²), puede expresarse como producto del coeficiente de la transferencia por evaporación h_{ew} (W/m² K), por la diferencia entre las presiones parciales del vapor del agua y de las temperaturas del cristal, P_w y P_g (Pa). Por tanto:

$$q_{ew} = h_{ew} (P_w - P_g)$$

La relación entre los coeficientes de la transferencia del calor mediante convección y evaporación es (Malik, Tiwari, Kumar, & Sodha, 1982):

$$h_{ew}/h_{cw} = 16,273 \times 10^{-3}$$

Introduciendo entonces esta relación en la fórmula del cálculo de la transferencia del calor, q_{ew} (W/m²), tenemos:



$$q_{ew} = 16,273 \times 10^{-3} h_{cw} (P_w - P_g)$$

El valor del agua destilada producida por hora y por m² de la cubeta del destilador se puede entonces calcular a través de:

$$m_w = \frac{q_{ew}}{\lambda}$$

2.3 Descripción de la experiencia

El sistema descrito estuvo en funcionamiento durante los meses de Enero a Mayo de 2005. Se analizaron las variables climáticas, que caracterizaban las condiciones ambientales en el invernadero y destilador solar, así como la producción de destilado. Se registraron los valores de esta última cada minuto, y se determinó la productividad de cada hora y día.

De los datos obtenidos en esta experiencia, hemos analizado tres conjuntos de datos: el formado por los días 28-29 de Enero (invierno), y los formados por los días 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo (primavera). El objetivo ha sido evaluar los parámetros climáticos (temperatura; radiación solar; radiación PAR; humedad relativa) en todos los sectores del sistema invernadero-destilador solar, así como el destilado producido, en cada conjunto de días pertenecientes a dos estaciones distintas del año, invierno y primavera.



3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se exponen y analizan los datos obtenidos durante la fase experimental, así como la discusión del comportamiento de los distintos parámetros.

3.1 Datos obtenidos

3.1.1 Estado del clima de los días analizados

Los días analizados se encontraban en condiciones de cielo despejado y soleado como podemos verificar en la Tabla 5.

Tabla 5 – Condiciones climáticas de los días analizados en año 2005.

Mes	Días	Condiciones climáticas	Período Diurno	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)
Enero	28	Cielo despejado y soleado	9 horas (07:00 – 16:00)	15,6	0
	29	Cielo despejado y soleado	9 horas (07:00 – 16:00)	19,1	6,2
Abril	27	Cielo despejado y soleado	13 horas (05:00 – 18:00)	26,4	11,2
	28	Cielo despejado y soleado	13 horas (05:00 – 18:00)	28,2	10,7
Mayo	7	Cielo despejado y soleado	13 horas (05:00 – 18:00)	27,2	12,5
	8	Cielo prácticamente despejado y soleado	13 horas (05:00 – 18:00)	24,2	14,4

3.1.2 Radiación Solar Global y Radiación solar PAR

La fracción de radiación solar global y PAR, está en función del diseño del sistema. Tanto la cantidad de radiación solar global disponible para el proceso de destilación, como la cantidad de radiación solar PAR disponible para el cultivo, están condicionadas por los materiales de construcción y la geometría y la orientación del destilador e invernadero.

A continuación, en la Figura 23, se representa la cantidad de radiación solar global registrada en las distintas secciones del sistema invernadero-destilador solar: (i) en el exterior del invernadero; (ii) en el interior del destilador solar; y (iii) en el interior del invernadero, en el día 28 de Enero de 2005.

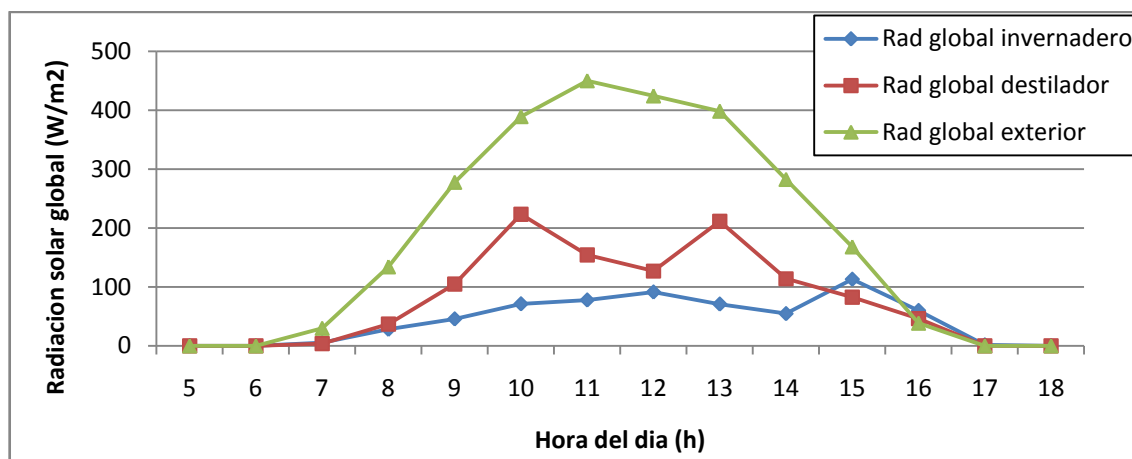


Figura 23 – Variação horária de la radiación solar global (W/m^2) registrada en el día 28 de enero de 2005, en el interior del invernadero y en el interior del destilador, así como en el exterior.

En primer lugar hay que destacar la variación anormal que se produjo en los valores registrados a las 11:00 y 12:00 horas en la radiación PAR al interior del destilador. Esto fue debido, probablemente al sombreado creado por la estructura metálica de la cubierta sobre el piranómetro situado al interior del destilador en las horas centrales del día. Para que los valores de transmitancia calculados fueran representativos, los valores de radiación solar en todas las secciones para las horas 11:00 y 12:00, no fueron contabilizados.

Como podemos comprobar en la Figura 23, la variación de la radiación solar global registrada en el exterior del invernadero se puede definir por una variación senoidal, registrando un valor máximo de irradiancia de 450 W/m^2 sobre las 11:00 horas, y obteniendo un valor diario de $6,19 \text{ MJ/m}^2$ de potencia de radiación solar (Tabla 6).

En la Tabla 6 se puede observar la radiación solar global registrada en el destilador sufre una disminución del 52% comparada con el valor registrado en el exterior. Esta disminución se debe en su mayoría a la capacidad de transmitancia del cristal de la cubierta del invernadero, y también al sombreado creado por su estructura metálica. Por lo tanto el valor de la transmitancia correspondiente al cristal y a la estructura metálica de la cubierta es del 48%.

Igualmente se observa que la radiación solar global registrada en el interior del invernadero presenta una disminución de 74% comparada con la registrada en el exterior, y una disminución del 45% cuando la comparamos con el valor registrado en el destilador solar (Tabla 6). La diferencia entre los valores registrados en el destilador y en el invernadero es



resultado del efecto del sombreado creado por las cubetas del destilador solar, su estructura de soporte y las planchas de aislamiento. Consecuentemente el valor de transmitancia correspondiente a las cubetas e al agua en su interior y de la estructura de soporte del destilador solar es del 55%.

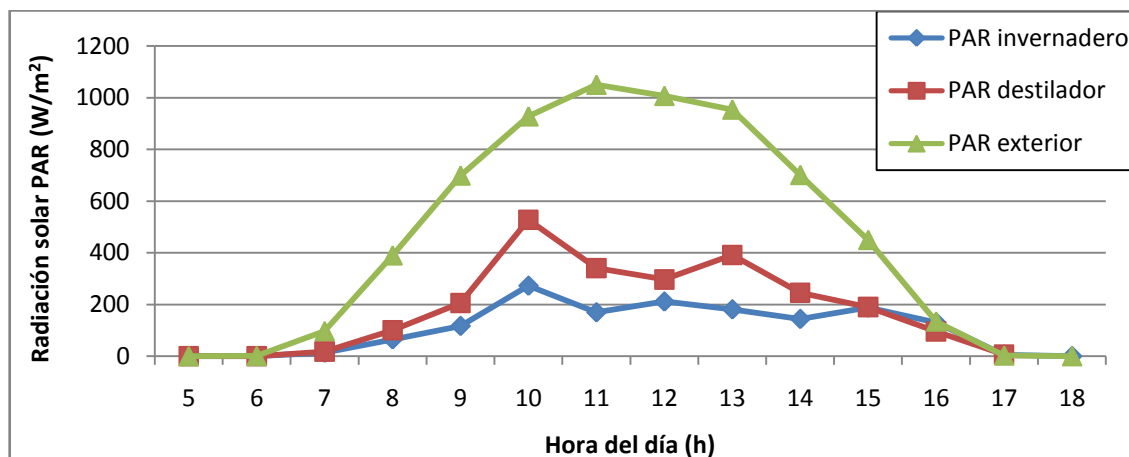


Figura 24 – Variación horaria de la radiación solar PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) registrada en el día 28 de Enero de 2005, en el interior del invernadero y en el interior del destilador, así como en el exterior.

En la Figura 24 se muestra el registro diario de radiación PAR, que fue de $15,69 \text{ mol}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$.

El valor máximo de radiación PAR al exterior del invernadero fue de $1050,7 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, y se registro a las 11:00 (Tabla 6).

Al igual que en el caso de la radiación solar global, los registros de la radiación PAR al interior del destilador solar a las 11:00 y 12:00 no han sido contabilizados para el cálculo de transmitancia, ya que se ven afectado por las mismas circunstancias. La radiación PAR en el destilador y en el invernadero sufre una disminución comparada con el exterior, de 59% y 74% respectivamente (Tabla 6).

Así se ha podido obtener el mismo valor de transmitancia de 26% para la radiación solar global y para la radiación solar PAR entre el exterior y el invernadero en el día 28 de Enero de 2005.

Se puede verificar así, que para la radiación solar PAR, la variación registrada (Figura 24) es muy similar a la de radiación solar global (Figura 25).



Seguidamente en las Figuras 25, 26 y 27, se compara la variación de radiación solar global y PAR para las distintas secciones del sistema para los días 28 de Enero, 27 de Abril y 7 de Mayo.

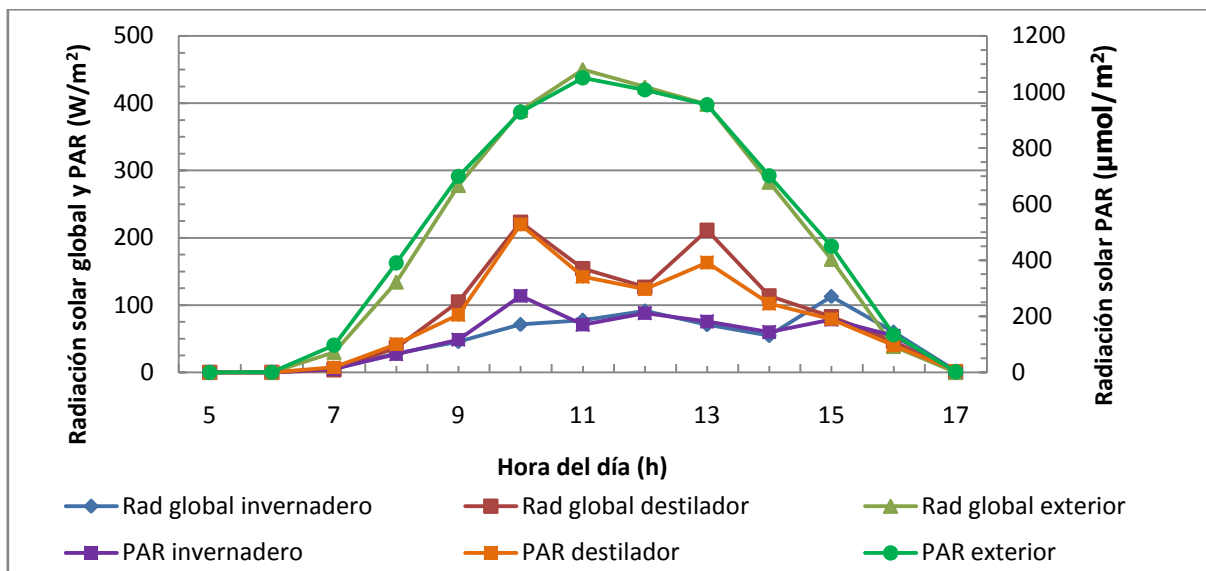


Figura 25 - Variación horaria de la radiación solar global (W/m^2) y radiación solar PAR ($\mu\text{mol/m}^2$) registrada en el día 28 de Enero de 2005, en el interior del invernadero y en el interior del destilador, así como en el exterior.

En la Tabla 6 podemos observar que, para la radiación solar PAR se ha obtenido una transmitancia entre el exterior y invernadero de 30% y de 31%, en los días 27 de Abril y 7 de Mayo de 2005 respectivamente. Hay que destacar que para el cálculo de la transmitancia en el día 27 de Abril, los valores de radiación solar global y PAR registrados durante las 10:00 y 11:00 no han sido contabilizados. Los valores entre las 9:00 y 11:00 horas para el día 7 de Mayo. Estos valores no han sido contabilizados debido a las interferencias resultantes del efecto del sombreado en los respectivos piranómetros y sensores de radiación PAR referidas anteriormente.

Este aumento de la transmitancia en comparación con el valor obtenido para el día 28 de Enero (23%), se puede explicar con el aumento del ángulo de incidencia de la radiación solar Global y radiación solar PAR en el día 27 de Abril y 7 de Mayo. En el mes de Enero las trayectorias solares tienen una altura solar más baja y por tanto los ángulos de incidencia son mayores.

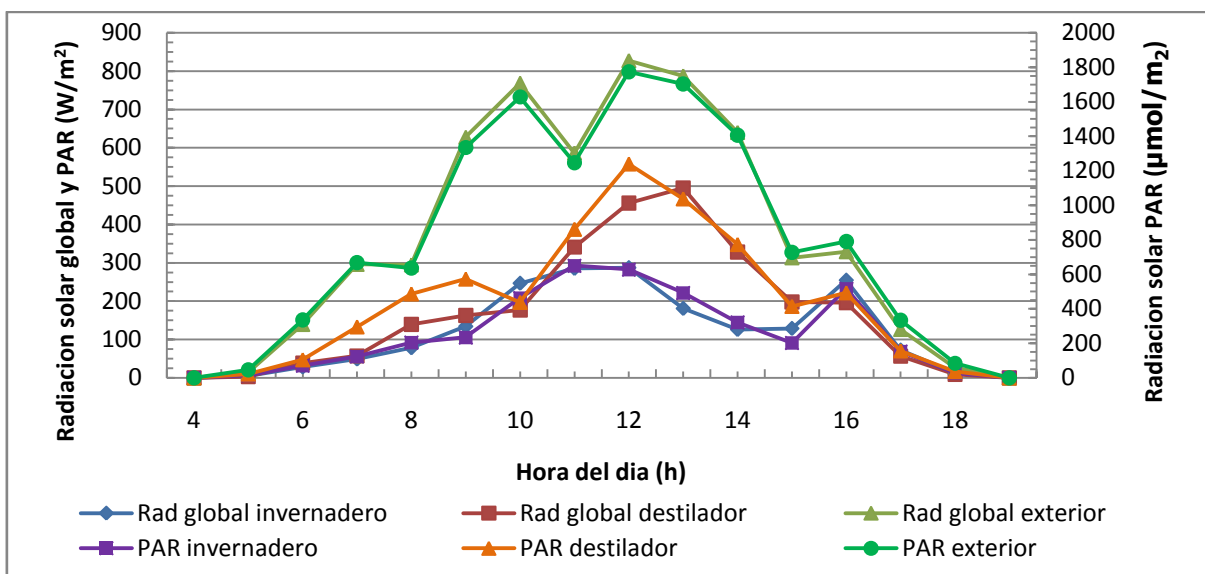


Figura 26 – Variação horária de la radiación solar global (W/m^2) y radiación solar PAR ($\mu\text{mol/m}^2$) registrada en el día 27 de Abril de 2005, en el interior del invernadero y en el interior del destilador, así como en el exterior.

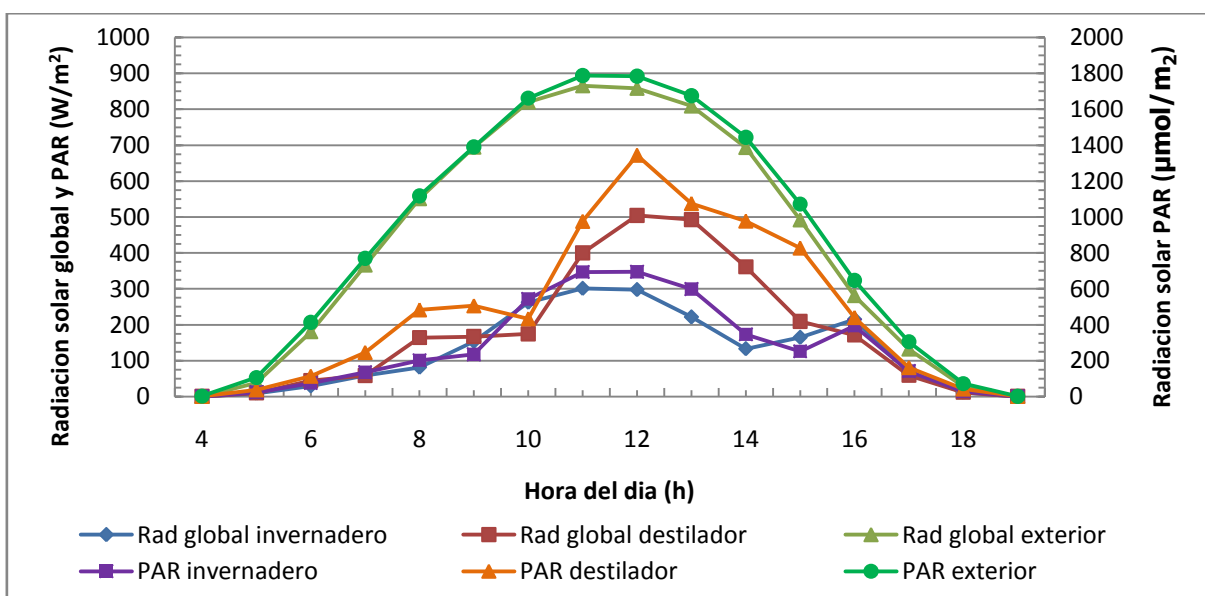


Figura 27 - Variação horária de la radiación solar global (W/m^2) y radiación solar PAR ($\mu\text{mol/m}^2$) registrada en el día 7 de Mayo de 2005, en el interior del invernadero, y en el interior del destilador, así como en el exterior.

Las características ópticas del cristal de la cubierta y del policarbonato de las cubetas son similares y poco selectivas respecto a los tipos de radiación solar, global y PAR, teniendo en cuenta que los valores de transmitancia obtenidos han sido similares.



Tabla 6 - Radiación solar global y radiación solar PAR horaria observada en los distintos puntos del sistema invernadero-destilador solar, durante el día 28 de Enero de 2005. Radiacion solar Global y radiacion solar PAR diaria durante el dia 27 de Abril y 7 de Mayo (* valores no contabilizados para el cálculo de la transmitancia, debido al efecto del sombreado que ha sufrido el piranómetro y el sensor PAR).

Hora	Gext	Gdest	Ginvernad	PARext	PARdest	PARinvernad
h	W/m ²	W/m ²	W/m ²	μmol/m ² .s	μmol/m ² .s	μmol/m ² .s
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0
7	30,0	3,9	5,5	96,9	17,8	13,1
8	134,2	36,9	28,0	390,3	100,6	65,0
9	277,8	105,1	45,7	699,3	205,4	117,0
10	389,3	223,4	71,3	928,4	527,7	272,9
11	450,1*	154,3*	77,7*	1050,7*	341,1*	169,7*
12	424,4*	127,0*	91,3*	1007,8*	296,8*	211,5*
13	398,4	211,4	70,9	954,6	391,5	181,3
14	282,7	113,9	54,7	701,5	245,7	144,0
15	168,1	82,8	113,0	450,0	190,0	187,9
16	38,6	46,1	60,0	134,4	95,4	130,5
17	0,0	0,0	1,7	2,4	6,4	5,3
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Valores diarios	Día	MJ/m ² .día	MJ/m ² .día	MJ/m ² .día	mol/m ² .día	mol/m ² .día
	28/01	6,19	2,96	1,62	15,69	6,41
		100%	48%	26%	100%	41%
	27/04	15,92	7,71	4,89	35,43	20,28
		100%	48%	31%	100%	57%
	7/05	15,94	7,51	4,63	33,85	20,68
		100%	47%	29%	100%	61%



3.1.3 Análisis de las variables climáticas del sistema invernadero-destilador solar, y del agua destilada producida

3.1.3.1 Temperatura del aire en la sección del destilador y del invernadero

En las Figura 28, Figura 29 y Figura 30 podemos observar las variaciones horarias de la temperatura del aire al exterior del invernadero, en el interior del destilador y en el interior del invernadero durante los días 28-29 de Enero, 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo, respectivamente.

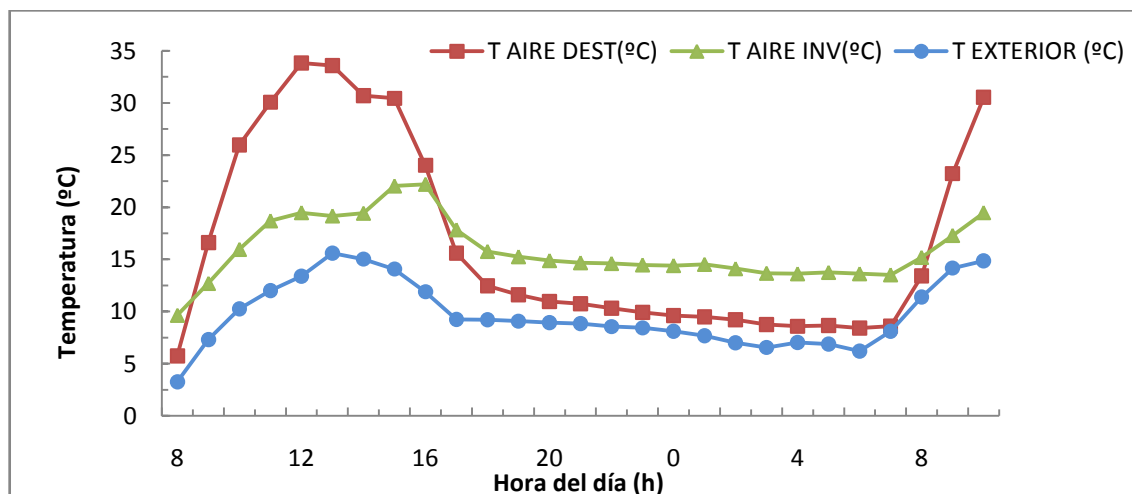


Figura 28 – Variación horaria de la temperatura del aire exterior y de las temperaturas interiores de las secciones del destilador y invernadero, durante el día 28-29 de Enero de 2005 desde las 08:00 del día 28 hasta las 10:00 del día 29.

Como se observa en la Figura 28 se pueden distinguir dos periodos: el diurno entre las 8:00 y las 17:00 horas; y el nocturno entre las 18:00 y las 7:00 horas. En el primero destacar que la temperatura del aire al interior del destilador creció rápidamente hasta alcanzar un máximo de 33,8°C a las 12:00 horas, resultado de la mayor incidencia de radiación solar. A partir de las 15:00 es cuando se observa una bajada muy brusca, resultado de la disminución de la radiación solar incidente. Por otro lado, la evolución de las temperaturas del aire del invernadero y del exterior, presenta una pauta de comportamiento similar entre ellas, aunque la primera muestra temperaturas superiores para toda la franja horaria.

En el periodo nocturno se observa que la temperatura del aire del destilador pasa a ser inferior a la del aire del invernadero, aunque se mantuvo ligeramente por encima de la



temperatura exterior, siendo prácticamente constante. Por lo tanto en este periodo la temperatura del aire del invernadero resulta ser la más alta y presentó una diferencia media constante en relación con la temperatura del aire exterior de 6,4 °C.

Teniendo en cuenta toda la franja horaria, el aire del invernadero manifestó una inercia térmica superior al aire del destilador, ya que la temperatura del invernadero se mantuvo más uniforme, oscilando entre los 22,2°C durante el día y los 12,7°C durante el periodo nocturno. Mientras que la temperatura en la sección del destilador osciló entre el máximo de 33,8°C diurno y los 8,4°C nocturnos.

Como podemos ver en las Figura 29 y Figura 30 la evolución de las temperaturas del aire al exterior, al interior del destilador y al interior del invernadero para los días 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo fue similar a la de los días 28-29 de Enero (Figura 28) descrita anteriormente.

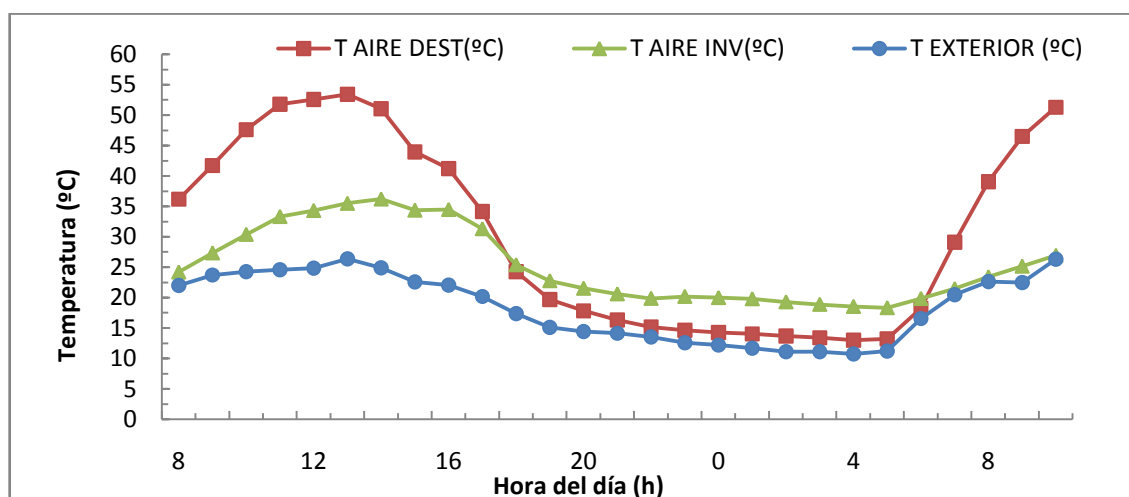


Figura 29 – Variación horaria de la temperatura del aire al exterior y de las temperaturas del interior de las secciones del destilador e invernadero durante el día 27-28 de Abril de 2005 desde las 08:00 del día 27 hasta las 10:00 del día 28.

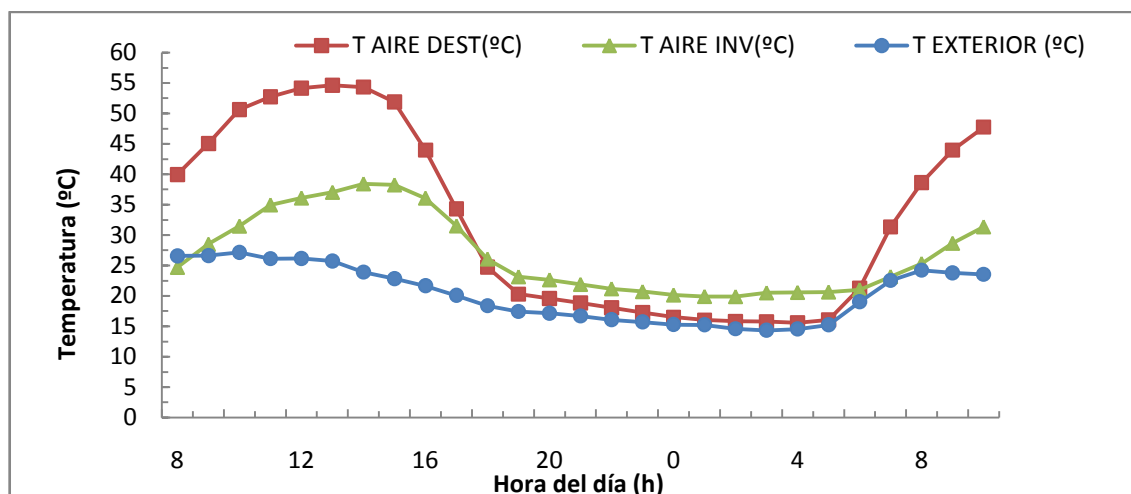


Figura 30 - Variação horária de la temperatura exterior y de las temperaturas del interior de las secciones del destilador e invernadero durante el día 7-8 de Mayo de 2005 desde las 08:00 del día 7 hasta las 10:00 del día 8.

En los días 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo, aumenta la duración del periodo diurno. En ambos casos se obtuvieron valores más elevados para todas las temperaturas medidas. Se registraron valores máximos para la temperatura del aire del destilador, de 53,4°C y 54,6°C, ambos a las 13:00 horas, hora de gran incidencia de radiación solar de los días 27 de Abril y 7 de Mayo respectivamente.

Por otro lado se han registraron valores mínimos en el periodo nocturno de 13°C y 15,6°C. Las temperaturas dentro del invernadero oscilaran menos que en al interior del destilador, registrando valores máximos de 36,2°C y 38,4°C, ambos sobre las 14:00 horas, y mínimos de 18,4°C y 19,9°C durante el periodo nocturno de los días 27 de Abril y 7 de Mayo respectivamente. Asimismo se puede verificar que el aire del destilador presentó una inercia inferior al aire del invernadero durante el periodo nocturno.

Hay que destacar que en los tres casos estudiados, la temperatura del aire del invernadero se mantuvo superior a la temperatura exterior durante el período nocturno. Durante este periodo, las diferencias entre la temperatura del aire del invernadero con respecto al exterior han sido de 6,4°C, 7,5°C y 5,6°C para los días 28-29 de Enero, 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo respectivamente. Tanto las temperaturas máximas como las mínimas de los tres casos estudiados, están en su mayoría dentro del rango de temperaturas recomendadas para cultivos en invernadero descrito en la introducción. En Abril y Mayo se han sobrepasado los valores recomendados para un cultivo de 10-30°C, pero solo por algunas horas.



3.1.3.2 Temperatura del agua de las cubetas y del cristal de la cubierta, Humedad relativa y Destilado Producido

Se sabe que la temperatura del agua de las cubetas y del cristal de la cubierta, así como la humedad relativa en el destilador son parámetros fundamentales en el proceso de destilación.

En primer lugar se analizará la evolución de la humedad relativa. En la Figura 31 podemos verificar la evolución de las temperaturas del agua y del aire del destilador, así como la humedad relativa registrada en el día 28-29 de Enero.

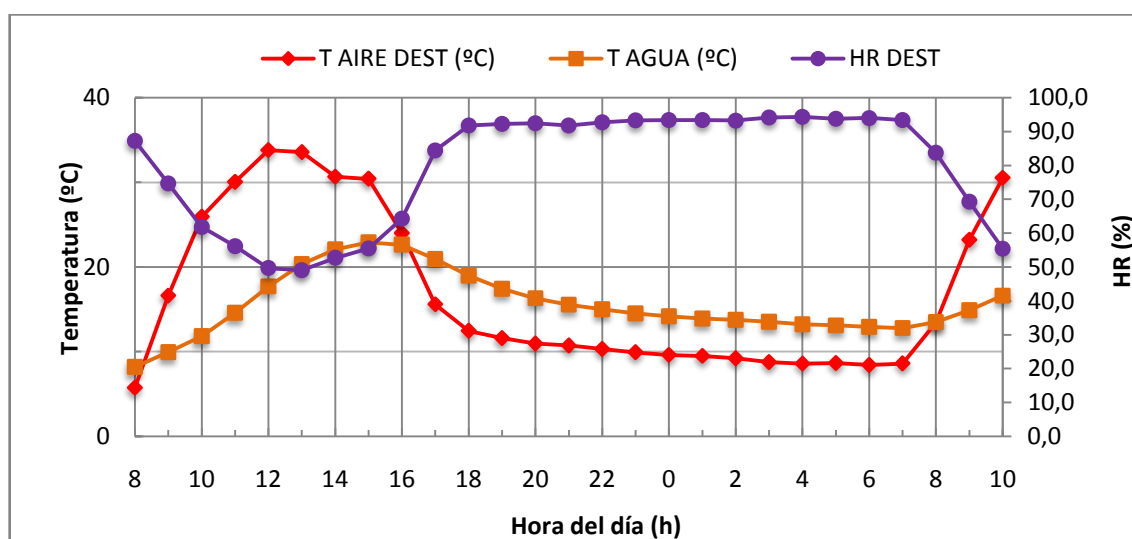


Figura 31 - Variación horaria de las Temperaturas (°C) del agua de las cubetas y del aire del destilador, así como la humedad relativa (%) registrada durante el día 28-29 de Enero.

Podemos observar que los valores de humedad relativa aumentaron cuando la temperatura del aire del destilador disminuyó (14:00 horas), incluso alcanzaron valores próximos a la saturación durante el período en el que las temperaturas del aire fueran inferiores a las temperaturas del agua (16:00 - 8:00 horas). Este comportamiento resulta del hecho de que por las mañanas ocurre mucha evaporación debido al aumento de la temperatura del agua de las cubetas. Esta evaporación hace que el aire esté cargado de vapor de agua, pero como la temperatura del aire del destilador es elevada, el aire puede aun soportar más vapor de agua, y como resultado el valor de humedad relativa no es muy elevado. Es por este motivo que cuando la temperatura del aire del destilador comienza a disminuir, y por consiguiente disminuye su capacidad de soportar vapor de agua, la humedad relativa del aire aumenta.



A continuación en la Figura 32, se puede observar la evolución de las temperaturas del agua de las cubetas y del cristal de la cubierta, y por consiguiente los valores de la humedad relativa registrados en la sección del destilador, y la cantidad de destilado producido para el día 28-29 de Enero.

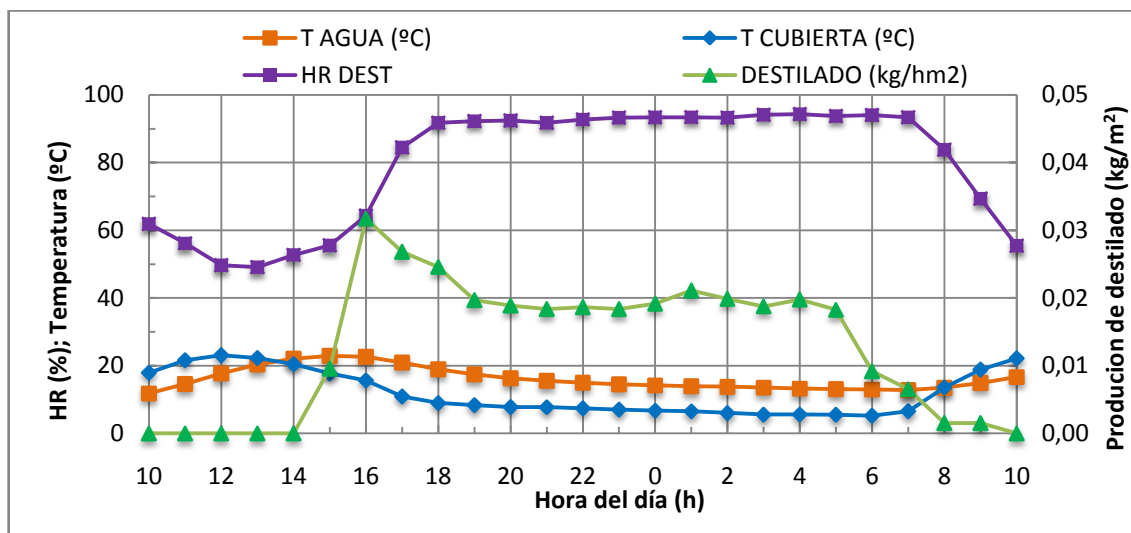


Figura 32 – Variación horaria de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas del destilador y del cristal de la cubierta (°C); Humedad relativa (%); y Destilado producido ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$) durante el día 28-29 de Enero.

Como se puede ver en la Figura 32, la temperatura del cristal de la cubierta es superior a la temperatura del agua de las cubetas durante la mañana, mientras que por la tarde y la noche se registran valores de temperatura inferiores a los del agua. La producción de destilado ocurre durante el periodo (14:00 – 8:00 horas) en el que ocurre la inversión térmica entre la temperatura del agua y la temperatura de la cubierta, y a su vez la la humedad relativa es superior a 50%.

¿Pero cómo explicar que sobre las 14:00 todavía no haya registro de producción de destilado, aun que la temperatura del cristal ya es inferior a la temperatura del agua y la humedad relativa ya registra un valor superior a 50%?

Para explicar este comportamiento hemos calculado y representado (Figura 33) la temperatura de rocío (T_r °C) a partir de los valores medidos de la humedad relativa (HR %) y temperatura del aire del destilador (T_{aird} °C) mediante la siguiente fórmula(Miliarium - Ingeniería Civil y Medio Ambiente):



$$Tr = \sqrt[8]{\frac{Hr}{100}} \times [112 + (0,9 \times T_{aird})] + (0,1 \times T_{aird}) - 112$$

La temperatura de rocío es la temperatura a partir de la cual empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire. En la Figura 33 y Tabla 7 se puede ver que la producción de destilado ocurrió justo en el período que la temperatura del cristal ha sido inferior a la temperatura del rocío del aire del destilador. A las 14:00 horas aún que la temperatura del cristal (20,5°C) ha sido inferior a la del agua (21°C), todavía no había alcanzado el valor de temperatura necesario (19,9°C) para el valor de humedad relativa registrado (52,7%), para que ocurriese el proceso de condensación entre el aire del destilador y el cristal de la cubierta.

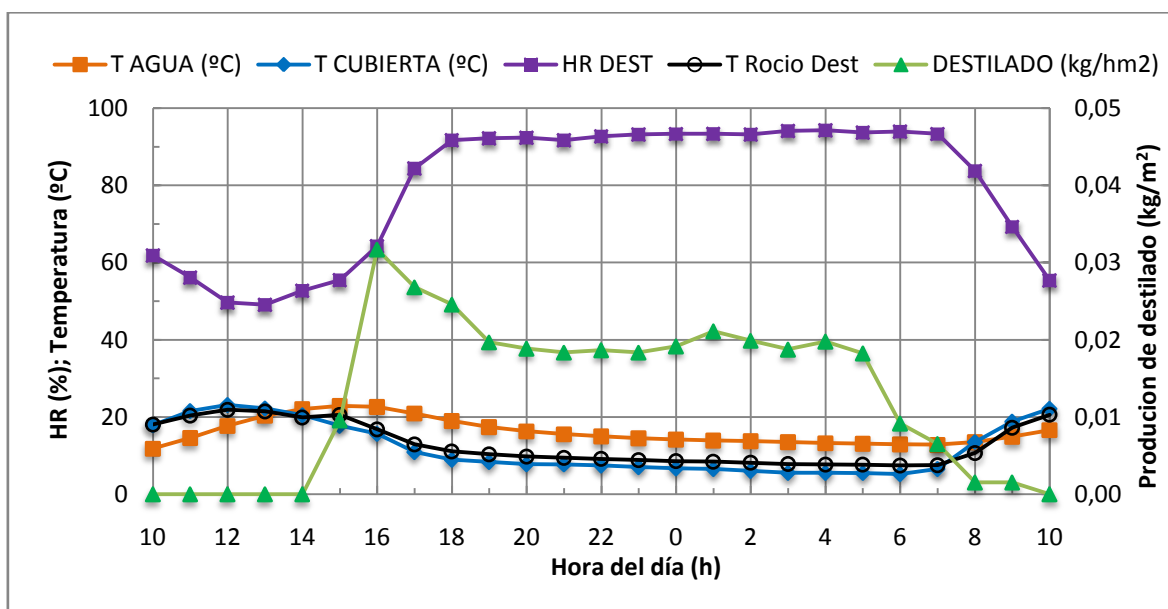


Figura 33 - Variación horaria de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas del destilador y del cristal de la cubierta (°C); Temperatura de rocío del aire del destilado (°C); Humedad relativa (%); y Destilado producido (kg/m².h) durante el día 28-29 de Abril.

Por lo tanto el proceso de condensación comienza a las 15:00 horas cuando la temperatura del cristal fue inferior a la temperatura de rocío del aire del destilador (Tabla 7). A partir de este momento la condensación aumenta rápidamente porque se condensa todo el vapor de agua que se ha ido incorporando al aire durante el periodo de insolación. Pasado este punto de gran condensación se da un equilibrio (19:00-5:00 horas) entre el agua que se



evapora y el vapor que se condensa, y por eso la producción de destilado fue mas constante.

Sobre las 8:00 horas, se observa como la temperatura del aire del destilador aumentó debido al aumento de la incidencia de la radiación solar, y por consiguiente la humedad relativa disminuyó. Lo que ha hecho que la temperatura de rocío haya aumentado, aun que la temperatura del cristal también aumentó y supero el valor calculado de la temperatura de rocío, terminando así el proceso de destilación a partir de ese momento. Los valores registrados entre las 8:00 y 10:00 horas se pueden explicar como un retraso la recogida debido al recorrido del destilado producido, entre los canalones y el depósito de recogida.

Tabla 7 – Valores horarios de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas y del cristal de la cubierta (°C); Temperatura de rocío del aire del invernadero (°C); Humedad relativa (%) y destilado producido durante el día 28-29 de Enero.

Hora	Dest. (kg/ m ²)	T agua (°C)	T cubierta (°C)	T aire dest. (°C)	T rocío dest. (°C)	HR dest. %
10	0,000	11,8	17,9	26,0	18,1	61,9
11	0,000	14,6	21,6	30,1	20,4	56,2
12	0,000	17,7	23,1	33,8	21,9	49,7
13	0,000	20,4	22,2	33,6	21,5	49,1
14	0,000	22,1	20,5	30,7	19,9	52,7
15	0,010	22,9	17,8	30,4	20,5	55,5
16	0,032	22,6	15,7	24,0	16,8	64,3
17	0,027	21,0	10,9	15,6	13,0	84,4
18	0,025	19,0	9,0	12,5	11,1	91,8
19	0,020	17,4	8,3	11,6	10,4	92,2
20	0,019	16,3	7,8	11,0	9,8	92,4
21	0,018	15,6	7,7	10,7	9,4	91,8
22	0,019	15,0	7,4	10,3	9,2	92,7
23	0,018	14,5	7,0	9,9	8,9	93,3
0	0,019	14,2	6,7	9,6	8,6	93,4
1	0,021	13,9	6,5	9,5	8,5	93,4
2	0,020	13,8	6,0	9,2	8,2	93,2
3	0,019	13,5	5,6	8,8	7,9	94,1
4	0,020	13,2	5,6	8,6	7,7	94,3
5	0,018	13,1	5,5	8,7	7,7	93,7
6	0,009	12,9	5,2	8,4	7,5	94,0
7	0,007	12,8	6,5	8,6	7,6	93,4
8	0,002	13,5	13,6	13,4	10,7	83,8
9	0,002	14,9	18,9	23,2	17,3	69,3
10	0,000	16,6	22,2	30,5	20,6	55,4



En las Figura 34 y Figura 35 junto con la Tabla 8, se ve la evolución del comportamiento de las variables durante los días 28-29 de Abril y 7-9 de Mayo. En ellas podemos observar que todas las variables se comportan de manera similar cuando las comparamos con la Figura 33 del día 28-29 de Enero.

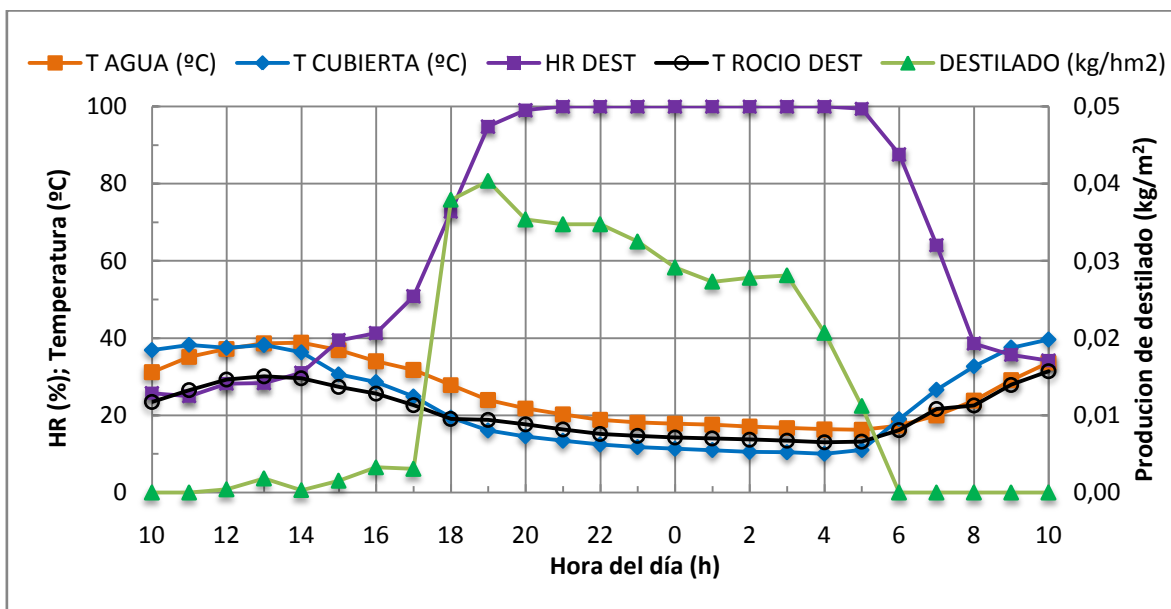


Figura 34 - Variación horaria de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas del destilador y del cristal de la cubierta (°C); Temperatura de rocío del aire del destilador (°C); Humedad relativa (%); y Destilado producido (kg/m²) durante el día 27-28 de Abril.

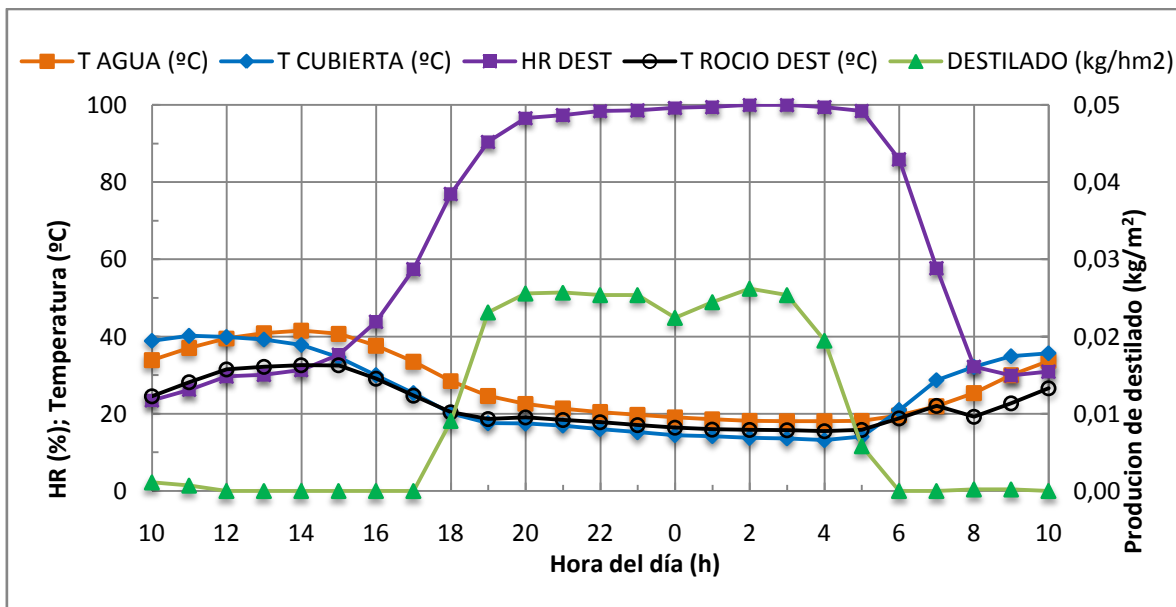


Figura 35 - Variación horaria de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas del destilador y del cristal de la cubierta (°C); Temperatura de rocío del aire del destilador; Humedad relativa (%); y Destilado producido (kg/m²) durante el día 7-8 de Mayo.



Tabla 8 - Valores horarios de los siguientes parámetros: Temperatura del agua de las cubetas y del cristal de la cubierta (°C); Temperatura de rocío del aire del invernadero (°C); Humedad relativa (%) y destilado producido durante los días 27-28 de Abril y 7-8 Mayo. (* Valores no contabilizados para análisis ya que su valor es muy pequeño y poco significativo).

Hora	27-28 de Abril					7-8 de Mayo				
	Dest. (kg/ m ²)	T ag (°C)	T cub. (°C)	T rocío dst. (°C)	HR dst. %	Dest. (kg/ m ²)	T ag (°C)	T cub. (°C)	T rocío dst. (°C)	HR dst. %
10	0,00000	31,2	36,9	23,5	25,8	0,00112	33,9	38,9	24,6	23,5
11	0,00000	35,1	38,3	26,6	25,0	0,00071	37,1	40,3	28,2	26,3
12	0,00041*	37,2	37,5	29,3	28,2	0,00000	39,5	39,9	31,5	29,7
13	0,00184*	38,7	38,3	30,1	28,4	0,00000	40,9	39,3	32,2	30,1
14	0,00031*	38,8	36,3	29,6	31,1	0,00000	41,5	37,9	32,6	31,3
15	0,00153*	36,9	30,6	27,3	39,5	0,00000	40,7	34,6	32,6	35,4
16	0,00326*	34,0	28,6	25,6	41,3	0,00000	37,7	30,0	29,1	43,9
17	0,00306*	31,8	24,9	22,6	50,8	0,00000	33,5	25,4	24,8	57,5
18	0,03793	27,8	19,5	19,1	72,8	0,00907	28,5	20,1	20,4	77,0
19	0,04038	24,0	16,1	18,8	94,8	0,02314	24,7	17,6	18,7	90,5
20	0,03538	21,8	14,6	17,7	99,1	0,02559	22,6	17,5	19,0	96,6
21	0,03477	20,2	13,4	16,3	100,0	0,02569	21,4	17,0	18,4	97,4
22	0,03477	18,8	12,4	15,2	100,0	0,02539	20,5	16,0	17,8	98,4
23	0,03252	18,1	11,8	14,7	100,0	0,02539	19,8	15,3	17,1	98,6
0	0,02916	17,8	11,4	14,3	100,0	0,02243	19,1	14,5	16,4	99,2
1	0,02732	17,6	11,0	14,1	100,0	0,02447	18,6	14,2	16,0	99,5
2	0,02783	17,1	10,5	13,7	100,0	0,02620	18,2	13,8	15,8	100,0
3	0,02814	16,7	10,4	13,4	100,0	0,02539	18,1	13,6	15,8	100,0
4	0,02070	16,4	10,1	13,0	100,0	0,01947	18,1	13,2	15,5	99,4
5	0,01122	16,2	11,0	13,1	99,4	0,00581	18,2	14,1	15,8	98,5
6	0,00000	17,3	19,0	16,1	87,6	0,00000	19,6	21,0	18,8	85,9
7	0,00000	20,0	26,6	21,6	64,1	0,00000	22,0	28,8	22,0	57,7
8	0,00000	23,8	32,7	22,6	38,6	0,00020	25,4	32,2	19,3	32,2
9	0,00000	29,1	37,6	27,9	35,7	0,00020	30,1	35,0	22,8	29,9
10	0,00000	33,6	39,7	31,4	34,2	0,00000	33,7	35,7	26,6	30,9

Al analizar en conjunto las Figura 33, Figura 34 y Figura 35 se observa que la producción de destilado empieza cuando están garantizadas simultáneamente las siguientes situaciones: (i) la temperatura del cristal de la cubierta es inferior a la temperatura del agua de las cubetas; (ii) la temperatura del cristal de la cubierta es igual (valor decimal) o inferior a la temperatura de rocío del aire del destilador.

Se puede verificar también que la producción de destilado ocurre en su mayoría y casi a un nivel constante cuando están garantizadas simultáneamente las siguientes situaciones: (i) la temperatura del agua de las cubetas es superior a la temperatura del cristal de la cubierta; (ii) la temperatura del cristal de la cubierta es inferior a la temperatura del aire del



invernadero; (iii) el valor de humedad relativa (HR %) es superior a 90% (Tabla 9); (iv) equilibrio entre lo que se evapora y lo que se condensa.

Tabla 9 – Volumen diario de destilado producido total y para HR>90%.

	Destilado producido l/m ²		
	28 – 29 enero	27- 28 abril	7-8 mayo
Volumen total (l/m².d)	0,322	0,368	0,258
Volumen producido (l/m².d) para HR>90%	0,294	0,331	0,233
Volumen producido en % para HR>90%	91%	89,9%	90,3%

En la Tabla 9 se verifica que aproximadamente 90% del destilado ha sido producido mediante condiciones de casi saturación del aire húmedo en la sección del destilador.

En las Figura 33, Figura 34 y Figura 35 se puede también observar que el sistema invernadero-destilador solar del experimento tiene un comportamiento retrasado en comparación con los destiladores solares comunes. En nuestro experimento, el proceso de destilación ha empezado 4 a 5 horas después del mediodía (hora de mayor absorbancia de radiación solar) y se ha prolongado durante el periodo nocturno hasta aproximadamente el inicio de la mañana del día siguiente.

Este comportamiento se debe en su mayoría a las relaciones: (1) entre la temperatura del agua de las cubetas y del aire del destilador, que afecta al proceso de evaporación (Figura 31); (2) entre la temperatura del aire del destilador y del cristal de la cubierta (Figura 33, Figura 34 y Figura 35).

(1) El hecho de que las cubetas fuesen transparentes ha conllevado a que la temperatura del agua en estas, haya subido muy lentamente. Provocando una evaporación limitada y por tanto la saturación del aire del destilador no se produce, lo que se traduce en una reducción de la temperatura de rocío, dificultando así la condensación. Al comenzar la tarde la temperatura del aire empieza a disminuir, lo que hace aumentar la humedad relativa, que supone el aumento de la temperatura de rocío del aire del destilador.

(2) Cuando la diferencia entre las dos temperaturas y el valor la humedad relativa alcanzan condiciones favorables, el proceso de condensación del aire húmedo sobre el cristal empieza, y por consiguiente el proceso de destilación.



3.1.4 Análisis de las cantidades de destilado producido

En esta sección vamos a comparar el destilado producido durante los días analizados de, 28-29 de Enero (invierno), 27-29 de Abril y 7-9 de Mayo (primavera).

En la Tabla 10 y en la Figura 36, podemos observar los valores horarios y diarios del destilado producido, durante distintos días del año 2005.

Tabla 10 – Valores horarios y diarios del destilado producido, durante distintos días del año 2005 (* valores no contabilizados debido a su valor poco significativo).

hora	28 – 29 enero	27- 28 abril	7-8 mayo
14	0,000	0,000*	0,000
15	0,010	0,002*	0,000
16	0,032	0,003*	0,000
17	0,027	0,003*	0,000
18	0,025	0,038	0,009
19	0,020	0,040	0,023
20	0,019	0,035	0,026
21	0,018	0,035	0,026
22	0,019	0,035	0,025
23	0,018	0,033	0,025
0	0,019	0,029	0,022
1	0,021	0,027	0,024
2	0,020	0,028	0,026
3	0,019	0,028	0,025
4	0,020	0,021	0,019
5	0,018	0,011	0,006
6	0,009	0,000	0,000
7	0,007	0,000	0,000
8	0,002*	0,000	0,000
9	0,002*	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000
Suma (l/m ² /d)	0,322	0,368	0,258

De ellas se puede verificar que la producción de destilado ocurre en períodos más largos en los días de Enero, que en los días de Abril o Mayo. En los días de Enero la producción se prolonga durante 17 horas, entre las 15:00 y las 07:00 horas de la mañana del día siguiente. Mientras que en Abril y Mayo empiezan 3 horas después, a las 18:00, prologándose durante 12 horas hasta las 5:00 horas de la mañana del día siguiente.



A pesar de que el periodo de destilación durante el día 28-29 de Enero es más largo, ha registrado una menor producción de destilado diario que en Abril. Esta situación se puede explicar ya que a pesar de periodos más pequeños, han sido superiores en términos de intensidad de producción horaria.

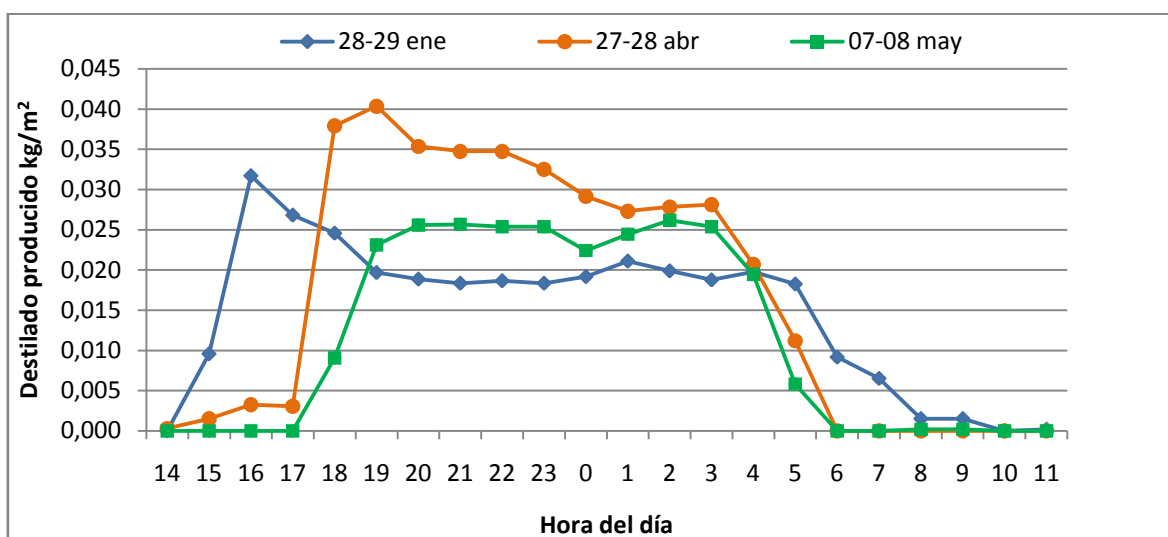


Figura 36 – Variación horaria de la producción de destilado (kg/m^2) para los días 28-29 de Enero, 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo de 2005.

Estas oscilaciones entre los periodos de producción de destilado se pueden explicar por el periodo del año en que se sitúa cada mes en cuestión. En invierno las temperaturas exteriores (Tabla 5) son menores, y las del cristal de la cubierta disminuyen más rápido, por lo que tardan más tiempo en aumentar que en primavera, manteniendo la diferencia entre la temperatura del aire del destilador con la del cristal de la cubierta en un gradiente favorable a la producción del destilado durante periodos más largos.

En Enero el periodo de destilación se prolonga más, ya que las temperaturas mínimas medias exteriores son menores.

En Abril se da una mayor incidencia de radiación solar, así como temperaturas mínimas medias exteriores superiores a Enero. Lo que origina tasas de producción de destilado horario mayores, pero periodos de destilación más pequeños.

En Mayo aunque el periodo de destilación tiene la misma duración de Abril, la temperatura media exterior ha sido superior. Traduciéndose así en una menor producción de destilado.



3.1.5 Simulación de la producción de destilado mediante la aplicación de un modelo teórico de transferencia de masa y calor

En esta sección vamos proceder a la validación del modelo teórico de previsión de destilado producido desarrollado por Dunkle, (1961). Para la validación han sido usados los datos obtenidos de los días 28-29 de Enero, 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo. Las variables necesarias han sido calculadas mediante las siguientes fórmulas representadas en la Tabla 11:

Tabla 11 – Fórmulas de cálculo de cada una de las variables.

Variáveis	Fórmulas
Presión parcial del vapor para la temperatura del agua de las cubetas (P _w ; Pa) en que T _w es la temperatura del agua en °K.	$P_w = e^{(25,317-5144/T_w)}$
Presión parcial del vapor para la temperatura del cristal de la cubierta (P _g ; Pa) en que T _g es la temperatura del cristal en °K.	$P_g = e^{(25,317-5144/T_g)}$
Coefficientes de la transferencia del calor (h _{cw} ; W/m ² .°C)	$h_{cw} = 0.884 \left[\frac{(P_w - P_g)(273 + T_w)}{268.9 \times 10^3 - P_w} + (T_w - T_g) \right]^{1/3}$
Transferencia del calor (q _{ew} ; W/m ²)	$q_{ew} = 16,273 \times 10^{-3} h_{cw} (P_w - P_g)$
Agua destilada producida (m _w ; kg/m ² .h), en que λ es el calor latente de vaporización del agua.	$m_w = \frac{q_{ew} \cdot 3600}{\lambda}$

En las Figura 37, Figura 38 y Figura 39 podemos observar el resultado de la simulación realizado comparado con los valores reales obtenidos, durante el periodo de mayor producción de destilado, de las 14:00 a las 8:00 horas de cada uno de los días en análisis.

En la Figura 37, correspondiente al 28-29 de Enero, se ve que el destilado producido por simulación tiene un comportamiento similar, pero con valores superiores a los reales. En las Figura 38 y Figura 39 correspondientes a los días 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo, el destilado simulado durante el periodo inicial (14:00 a las 19:00 horas) presenta un comportamiento que no encaja con la realidad. Mientras que durante las horas de HR>90%



(Tabla 12), en que los procesos de evaporación y destilación son estacionarios, el comportamiento del destilado simulado se asemeja al destilado real.

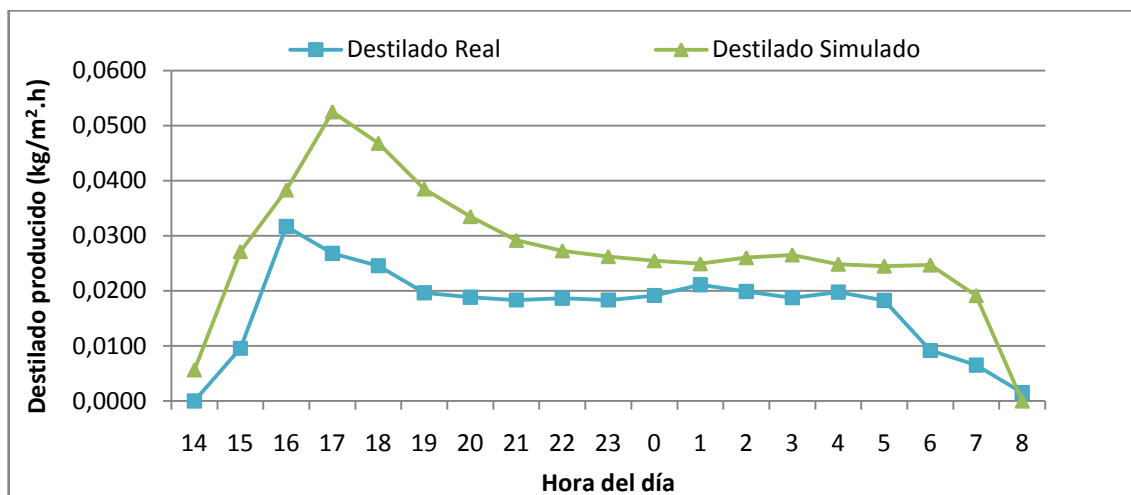


Figura 37 – Variación horaria del destilado producido, y del destilado simulado en el día 28-29 de Enero.

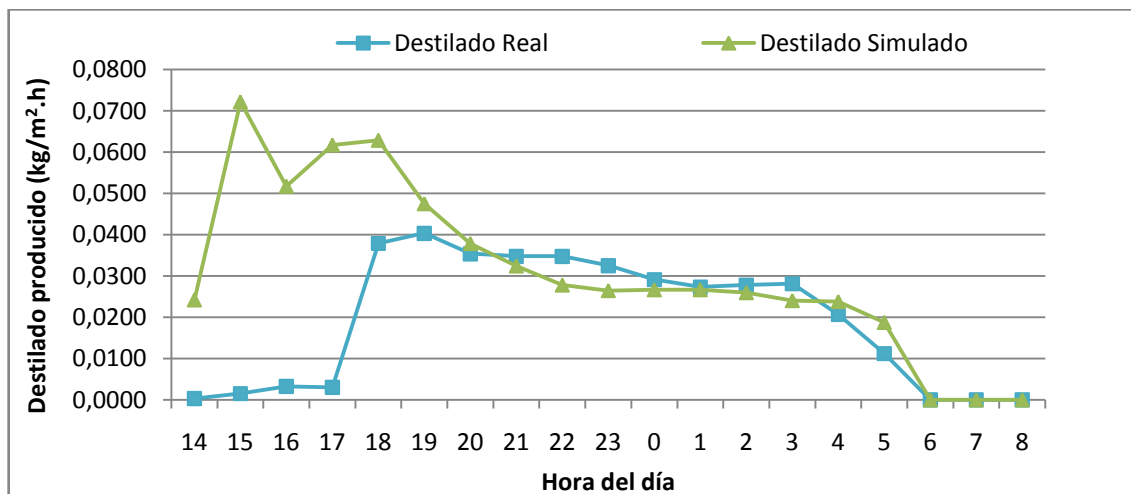


Figura 38 - Variación horaria del destilado producido, y del destilado simulado en el día 27-28 de Abril.

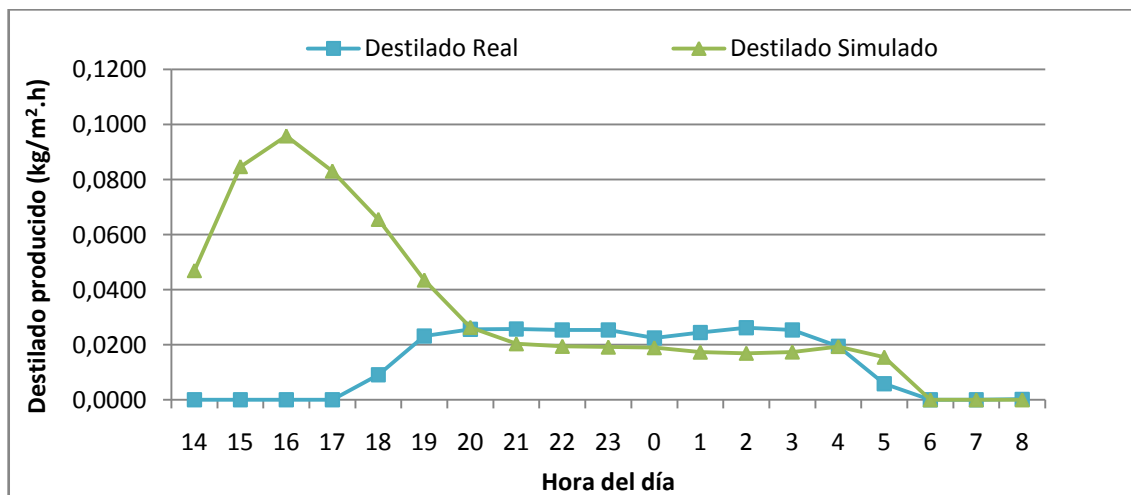


Figura 39 - Variación horaria del destilado producido, y del destilado simulado en el día 7-8 de Mayo.



Tabla 12 – Variación horaria del Destilado real y simulado (kg/m^2) y su correspondiente Humedad relativa (%).

28-29 de Enero			27-28 de Abril			7-8 de Mayo		
Dest real ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)	Dest simulado ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)	HR%	Dest real ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)	Dest simulado ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)	HR%	Dest real ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)	Dest simulado ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)	HR%
0,0000	0,0057	52,7	0,0003	0,0242	31,1	0,0000	0,0470	31,3
0,0096	0,0271	55,5	0,0015	0,0722	39,5	0,0000	0,0847	35,4
0,0317	0,0383	64,3	0,0033	0,0518	41,3	0,0000	0,0959	43,9
0,0268	0,0525	84,4	0,0031	0,0618	50,8	0,0000	0,0831	57,5
0,0246	0,0468	91,8	0,0379	0,0629	72,8	0,0091	0,0656	77,0
0,0197	0,0385	92,2	0,0404	0,0475	94,8	0,0231	0,0435	90,5
0,0189	0,0335	92,4	0,0354	0,0379	99,1	0,0256	0,0263	96,6
0,0184	0,0292	91,8	0,0348	0,0325	100,0	0,0257	0,0204	97,4
0,0187	0,0273	92,7	0,0348	0,0278	100,0	0,0254	0,0194	98,4
0,0184	0,0262	93,3	0,0325	0,0265	100,0	0,0254	0,0191	98,6
0,0192	0,0255	93,4	0,0292	0,0267	100,0	0,0224	0,0189	99,2
0,0211	0,0249	93,4	0,0273	0,0267	100,0	0,0245	0,0173	99,5
0,0199	0,0260	93,2	0,0278	0,0260	100,0	0,0262	0,0169	100,0
0,0188	0,0265	94,1	0,0281	0,0241	100,0	0,0254	0,0174	100,0
0,0198	0,0249	94,3	0,0207	0,0238	100,0	0,0195	0,0194	99,4
0,0183	0,0245	93,7	0,0112	0,0188	99,4	0,0058	0,0155	98,5
0,0092	0,0247	94,0	0,0000	0,0000	87,6	0,0000	0,0000	85,9
0,0065	0,0192	93,4	0,0000	0,0000	64,1	0,0000	0,0000	57,7
0,0015	0,0000	83,8	0,0000	0,0000	38,6	0,0002	0,0000	32,2

Para conseguir una aproximación más válida para la simulación, se ha aplicado el siguiente ajuste:

- (i) El modelo de simulación solo deberá ser aplicado durante el período en que la temperatura del cristal ($-0,5^\circ\text{C}$) sea igual o inferior a la temperatura de rocío del aire del destilador (Tabla 13).

En las Figura 40, Figura 41 y Figura 42, podemos observar la variación del destilado producido después de la aplicación del ajuste.

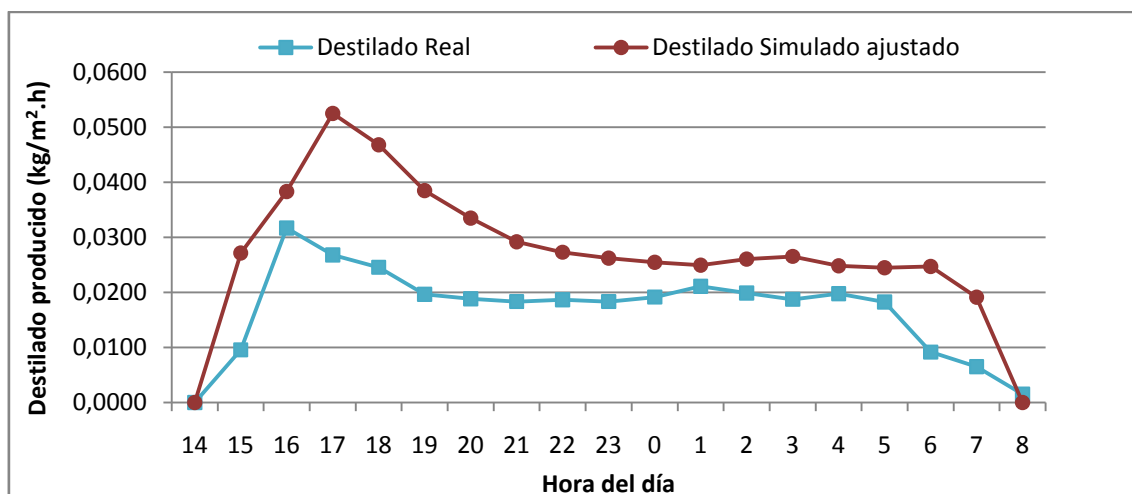


Figura 40 - Variación horaria del destilado producido, del destilado simulado y del destilado simulado en el día 28-29 de Enero.

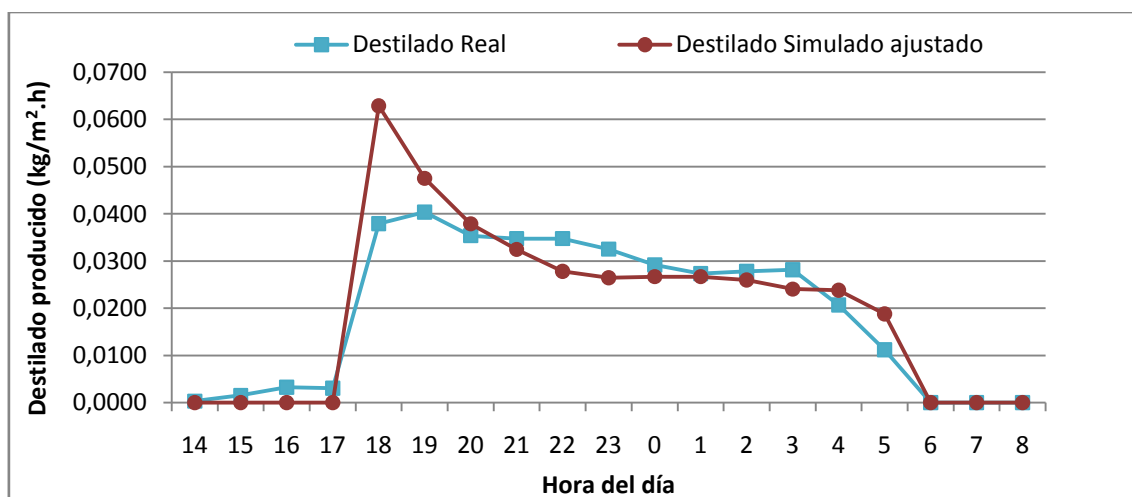


Figura 41 - Variación horaria del destilado producido, del destilado simulado y del destilado simulado en el día 27-28 de Abril.

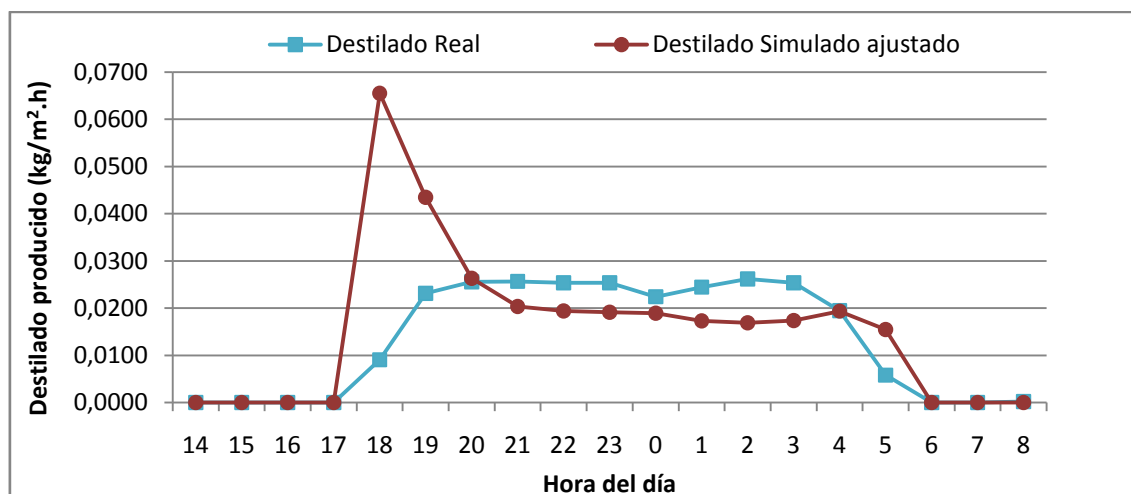


Figura 42 - Variação horária do destilado produzido, do destilado simulado e do destilado simulado em el día 7-8 de Mayo.

Tabla 13 – Variação horária do destilado simulado ajustado (kg/m2.h), de la temperatura del agua de las cubetas (°C) y de la temperatura de rocío del aire del destilador (°C).

28-29 de Enero			27-28 de Abril			7-8 de Mayo		
Dest simulado ajustado (kg/m².h)	T agua (°C)	T rocío (°C)	Dest simulado ajustado (kg/m².h)	T agua (°C)	T rocío (°C)	Dest simulado ajustado (kg/m².h)	T agua (°C)	T rocío (°C)
0,00000	20,5	19,95	0,00000	36,32	29,57	0,00000	37,88	32,60
0,02715	17,8	20,54	0,00000	30,64	27,33	0,00000	34,65	32,56
0,03833	15,7	16,84	0,00000	28,61	25,61	0,00000	30,01	29,14
0,05252	10,9	12,96	0,00000	24,88	22,61	0,00000	25,37	24,76
0,04682	9,0	11,15	0,06291	19,46	19,09	0,06557	20,08	20,42
0,03851	8,3	10,38	0,04754	16,11	18,84	0,04351	17,58	18,68
0,03351	7,8	9,78	0,03789	14,56	17,69	0,02634	17,50	19,04
0,02919	7,7	9,45	0,03246	13,43	16,35	0,02037	16,98	18,44
0,02730	7,4	9,19	0,02783	12,44	15,17	0,01943	16,05	17,82
0,02624	7,0	8,88	0,02649	11,78	14,68	0,01915	15,26	17,07
0,02549	6,7	8,60	0,02670	11,38	14,30	0,01894	14,49	16,39
0,02494	6,5	8,48	0,02670	11,01	14,05	0,01732	14,22	15,96
0,02604	6,0	8,18	0,02599	10,54	13,73	0,01692	13,80	15,84
0,02655	5,6	7,86	0,02407	10,45	13,43	0,01737	13,64	15,77
0,02485	5,6	7,72	0,02382	10,07	13,02	0,01937	13,21	15,50
0,02451	5,5	7,70	0,01879	11,04	13,15	0,01548	14,11	15,83
0,02470	5,2	7,50	0,00000	19,05	16,14	0,00000	20,96	18,83
0,01916	6,5	7,58	0,00000	26,65	21,63	0,00000	28,75	22,04
0,00000	13,6	10,72	0,00000	32,72	22,56	0,00000	32,19	19,26

Analizando las Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 y Figura 42 en conjunto con la Tabla 14, se puede verificar que la aplicación del modelo desarrollado por



Dunkle (1961) nos proporciona aproximaciones de 38,5%, 37,7% y 54,1% más elevadas que el valor real registrado. Mientras que la aplicación del modelo ajustado nos proporciona aproximaciones de 37,8%, 3,4% y 13,8% más elevadas que el valor real registrado.

Tabla 14 – Comparación del destilado producido real, del simulado y del simulado ajustado (kg/m².d) durante el período de las 14:00 a las 8:00.

	Destilado producido real (kg/m ² .d)	Destilado simulado (kg/m ² .d)	Destilado simulado ajustado (kg/m ² .d)
28-29 de Enero	0,3208	0,5214 38,5 % más elevado que el valor real	0,51578 37,8 % más elevado que el valor real
27-28 de Abril	0,3683	0,5912 37,7% más elevado que el valor real	0,38118 3,4% más elevado que el valor real
7-8 de Mayo	0,2585	0,5635 54,1% más elevado que el valor real	0,29977 13,8% más elevado que el valor real

3.1.6 Viabilidad en la aplicación del destilado producido para riego de cultivos bajo invernadero

En esta sección se ha hecho un estudio centrado en la viabilidad de la aplicación del destilado diario producido (Tabla 10) en los días 28-29 de Enero, 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo para el riego de algunos cultivos comunes de invernadero (Tabla 15).

Tabla 15 – Valores máximos y mínimos de agua necesaria para el riego (l/m².d) y la conductividad eléctrica (dS/m) máxima admisible para el buen rendimiento de cada tipo de cultivo.

Tipo de Cultivo	Valores máximos y mínimos de agua necesaria para el riego (l/m ² .d)	Conductividad eléctrica máxima soportable (dS/m)
Pepino	3,0	1,7
	0,6	
Tomate	3,5	1,7
	0,7	
Pimiento	4,3	1,0
	0,7	

En este estudio ha sido analizada la viabilidad de usar el destilado producido para diluir distintas categorías de agua para riego de cultivos bajo invernadero. Para este análisis, al volumen diario de destilado producido se han adicionado distintos volúmenes de agua de distintas conductividades eléctricas, con el objetivo de evaluar que porcentajes de dilución serían válidos para cada cultivo analizado (Anexo 2).



Ejemplo:

En el día 28-29 de Enero se obtuvo 0,322 (l/m².d) de destilado, a ese volumen se le adicionó un volumen de 4,3 (l/m².d) de agua con una conductividad eléctrica de 1 (dS/m), resultando en una dilución de 7% y un volumen total de 4,622 (l/m².d) de agua con una conductividad eléctrica de 0,930 (dS/m). En la Tabla A2a;**Error! No se encuentra el rigen de la referencia.** se puede observar los resultados obtenidos con distintos porcentajes de dilución y para distintos tipos de agua (Figura A1b).

Al juntar los datos de la Tabla 15 con los datos de las Tablas A2a, A2b y A2c, se obtiene las Figura 43, Figura 44, Figura 45 y las Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18 . En ellas se puede observar el tipo de dilución que cada tipo de agua necesita, admisibles por cada cultivo (pepino, tomate y pimiento).

Tabla 16 - Porcentaje de dilución mínima necesaria y volúmenes de agua máximos disponibles para cada tipo de agua (CE: 1; 1,5; 2,5; 2; 3) y cultivo, durante el día 28-29 de Enero. (* Indiferente; # No satisface la necesidad mínima de riego).

Tipo de Cultivo	Porcentajes mínimos y Volúmenes máximos (l/m ² .d) para cada tipo de agua									
	1		1,5		2		2,5		3	
	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}
Pepino (CE _{max} =1,7)	0	*	0	*	15	2,338	32	1,085	4 3	0,759
Tomate (CE _{max} =1,7)	0	*	0	*	15	2,338	32	1,085	4 3	0,759
Pimiento (CE _{max} =1)	0	*	33	1,070	50	0,658 #	60	0,551 #	6 7	0,496 #

En la Tabla 16 y Figura 43 podemos verificar que, utilizando el volumen de destilado producido durante el día 28-29 de Enero para diluir los tipos de agua considerada, de dudosa calidad o no válida para riego (CE de 2-3 dS/m), es posible realizar las diluciones mínimas de 15% a 43% y obtener un agua viable (CE<1,7 dS/m) para el riego del pepino y del tomate. Y todavía satisfacer las necesidades mínimas de riego de ambos (Tabla 15). En el caso del cultivo del pimiento, como es menos tolerante a la CE del agua (CE<1 dS/m), las diluciones realizadas para los tipos de agua de dudosa calidad o no válida (CE de 2-3 dS/m) no han proporcionado el volumen de agua mínimo necesario para el riego. Solo es posible realizar una dilución mínima de 33% sobre el tipo de agua de CE de 1,5 dS/m, que proporcione el volumen de agua mínimo necesario para el riego de este.

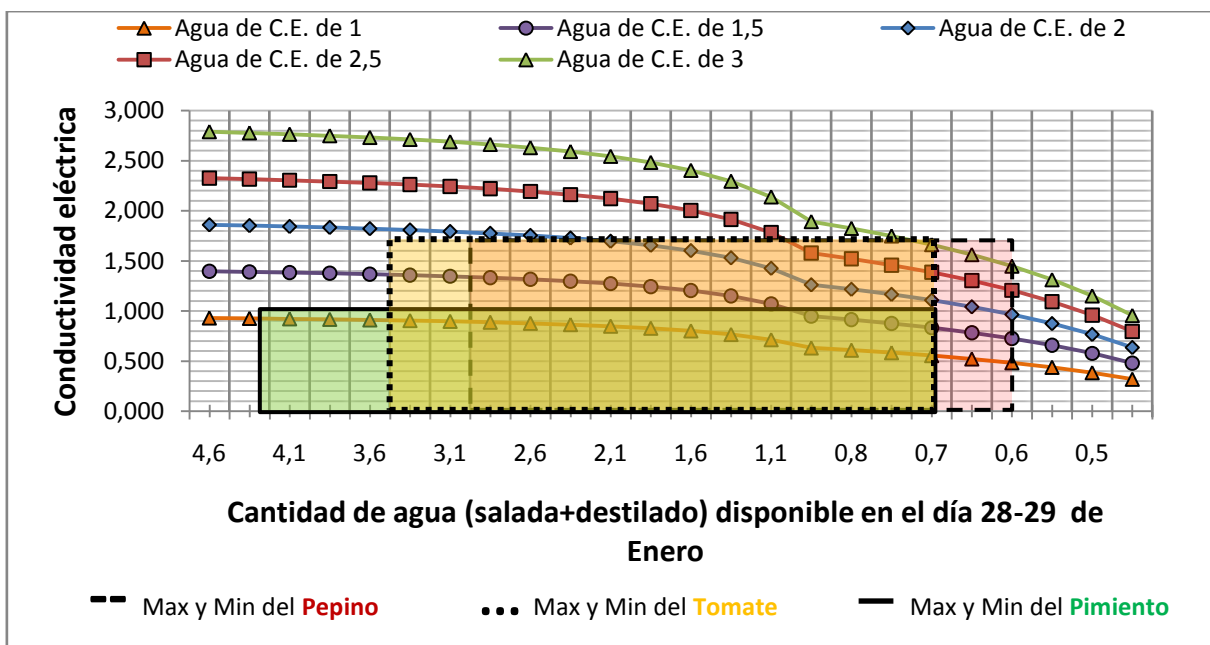


Figura 43 – Gráfica que exhibe las diluciones necesarias para cinco tipos de aguas para que sean admisibles por los cultivos, usando el destilado producido en el día 28-29 de Enero.

Los resultados obtenidos para los días 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo nos han proporcionado resultados muy similares (Tabla 17 y Tabla 18; Figura 44 y Figura 45). Los porcentajes mínimos de dilución han sido iguales para los tres días, ocurriendo apenas algunas alteraciones en los volúmenes máximos obtenidos: (i) en el caso del día 27-28 de Abril es posible realizar una dilución mínima del 50% para un agua de tipo 2, que proporcione el volumen de agua mínimo necesario para el riego del pimiento; (ii) en el caso del día 7-8 de Mayo la dilución del 43% para el agua de tipo 3 ya no nos proporciona el valor mínimo necesario para el riego del pepino.

Tabla 17 - Porcentaje de dilución mínima necesaria y volúmenes de agua máximos disponibles para cada tipo de agua (CE: 1; 1,5; 2,5; 2; 3) y cultivo durante el día 27-28 de Abril. (* Indiferente; # No satisface la necesidad mínima de riego).

Tipo de Cultivo	Porcentajes mínimos y Volúmenes máximos (l/m ² .d) para cada tipo de agua									
	1		1,5		2		2,5		3	
	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}
Pepino (CE _{max} =1,7)	0	*	0	*	15	2,636	32	1,162	43	0,860
Tomate (CE _{max} =1,7)	0	*	0	*	15	2,636	32	1,162	43	0,860
Pimiento (CE _{max} =1)	0	*	33	1,147	50	0,752	60	0,615	67	0,557

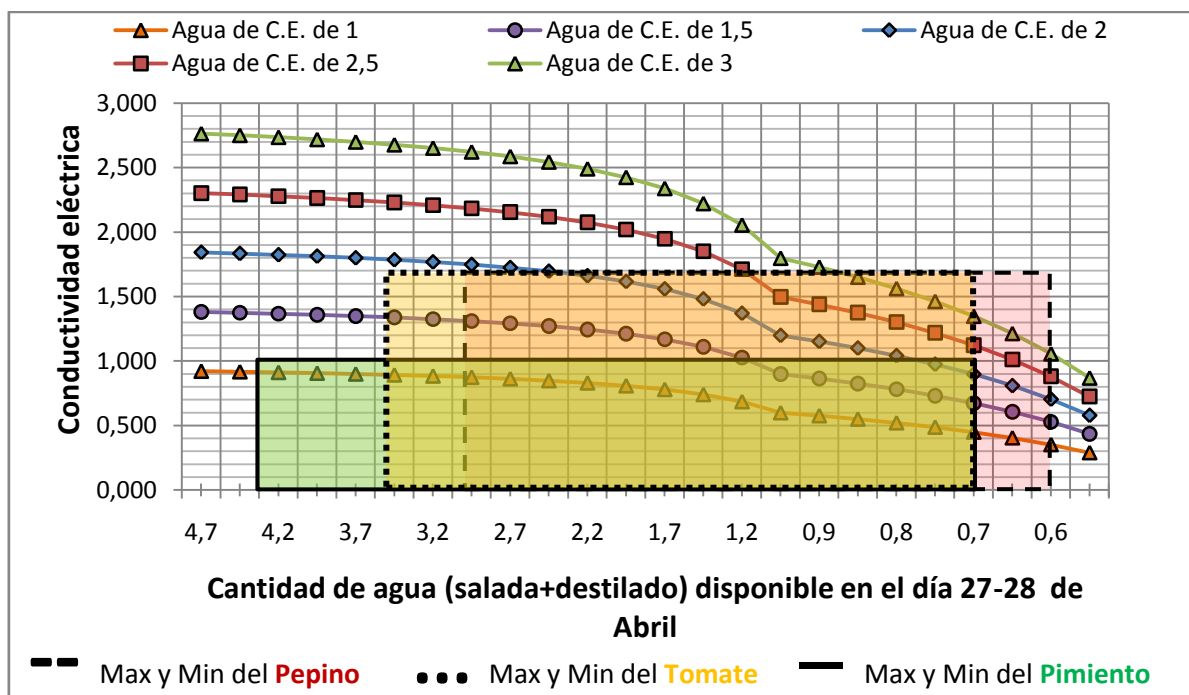


Figura 44 - Gráfica que exhibe las diluciones necesarias para cinco tipos de aguas para que sean admisibles por los cultivos, usando el destilado producido en el día 27-28 de Abril.

Tabla 18 - Porcentaje de dilución mínima necesaria y volúmenes de agua máximos disponibles para cada tipo de agua (CE: 1; 1,5; 2,5; 2; 3) y cultivo durante el día 7-8 de Mayo. (* Indiferente; # No satisface la necesidad mínima de riego).

Tipo de Cultivo	Porcentajes mínimos y Volúmenes máximos (l/m ² .d) para cada tipo de agua									
	1		1,5		2		2,5		3	
	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}	%	V _{max}
Pepino (CE _{max} =1,7)	0	*	0	*	15	1,795	32	0,807	43	0,603
Tomate (CE _{max} =1,7)	0	*	0	*	15	1,795	32	0,807	43	0,603
Pimiento (CE _{max} =1)	0	*	33	0,797	50	0,537	60	0,441	67	0,411

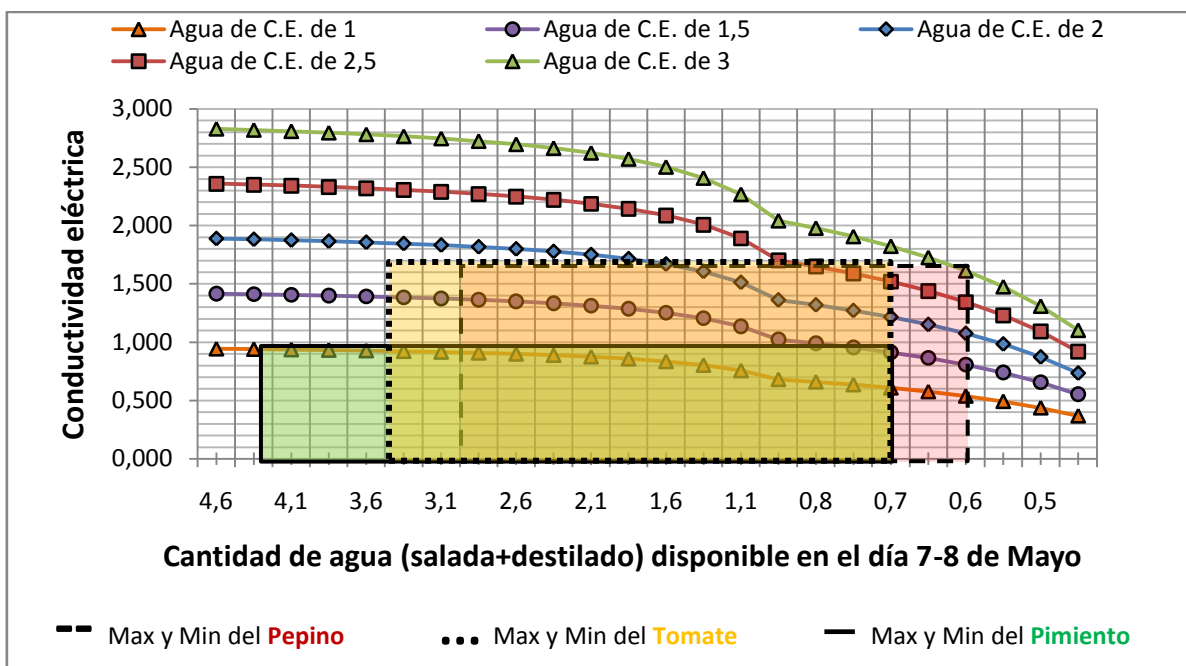


Figura 45 - Gráfica que exhibe las diluciones necesarias para cinco tipos de aguas para que sean admisibles por los cultivos, usando el destilado producido en el día 7-8 de Mayo.

Los resultados obtenidos nos dejan pensar que con los volúmenes de destilado producido durante los distintos días 28-29 de Enero, 27-28 de Abril y 7-8 de Mayo, seria claramente posible satisfacer los requerimientos mínimos de riego de cultivos tolerantes a la salinidad como el tomate y el pepino.



4 CONCLUSIONES

El análisis experimental del comportamiento y rendimiento del sistema invernadero-destilador solar, ha permitido concluir que su comportamiento depende de muchas variables climáticas. Sin embargo su rendimiento no solo depende de estas, sino también de algunos parámetros del diseño de construcción.

Las conclusiones más importantes de este trabajo son:

- La instalación del destilador en el techo del invernadero supuso: una disminución media en la radiación solar global disponible para el destilador del 48%; y una disminución media de la radiación solar PAR del 29% durante la primavera.
- Las características ópticas del cristal de la cubierta y del policarbonato de las cubetas y placas aislantes son similares y poco selectivas.
- La inercia térmica del aire del invernadero ha sido superior a la del aire del destilador, y sus temperaturas salvo algunas excepciones se han mantenido dentro del rango de temperaturas ideales para la mayoría de los cultivos.
- El destilador solar integrado ha tenido un comportamiento retrasado en comparación con un destilador solar convencional. Este comportamiento retrasado se debe al hecho de que las cubetas eran transparentes y por eso absorbían menos radiación solar, y como resultado calentaban más despacio el agua.
- La producción de destilado empezó cuando coexistían las siguientes situaciones: (i) la temperatura del cristal de la cubierta era inferior a la temperatura del agua de las cubetas; (ii) la temperatura del cristal de la cubierta es igual o inferior a la temperatura de rocío del aire del destilador.
- El 90% de la producción del destilado se ha producido en condiciones de casi-saturación del aire húmedo ($HR > 90\%$).



- La simulación de la producción horaria y diaria de destilado mediante el modelo teórico de Dunkle proporciona valores simulados entre aproximadamente 40-50% superiores a los valores reales.
- La simulación de la producción horaria y diaria de destilado mediante el modelo teórico de Dunkle solo es válida para el período de saturación del aire húmedo ($HR > 90\%$).
- El modelo teórico de Dunkle puede ser ajustado para una mayor aproximación al valor real, proporcionando valores simulados entre 10-30% superiores a los valores reales.
- Los volúmenes de destilado producido han sido suficientes para proporcionar diluciones mínimas de 15% a 43% para tipos de agua de dudosa calidad o inapropiadas para riego. Además las diluciones han proporcionado en su mayoría los volúmenes mínimos necesarios para el riego de cultivos como el pepino y el tomate.

RECOMENDACIONES:

- Disminuir el ángulo de la cubierta del destilador de 45° para 16° . Objetivo: aumentar la transmitancia de la cubierta.
- Cambiar las planchas aislantes de policarbonato por un material con mayor transmitancia.
- La estructura de soporte de las cubetas no necesitaba de ser tan resistente. Objetivo: disminuir el sombreado creado y bajar los costes de instalación.
- Cambiar el sistema de ventilación del invernadero por un sistema de refrigeración en el caso de cultivos sensibles a altas temperaturas.
- Adicionar colorantes selectivos en al agua de las cubetas, para que absorban la radiación solar infrarroja y que dejan pasar la radiación PAR. Objetivos: aumentar la absorción de radiación por el agua y como resultado la producción de destilado; bajar las temperaturas durante el día dentro del invernadero, y por consiguiente la



disminución de la transpiración del cultivo y de las necesidades de riego; bajando las temperaturas no es necesario el sistema de ventilación o refrigeración.

- Reducir la profundidad del agua de las cubetas para 2 cm. Objetivos: disminuir la masa térmica y como consiguiente el agua se calentará más rápido, provocando que la producción de destilado comience más pronto, aumentando así el periodo de destilación y el volumen total diario; bajar los costos de la fabricación de las bandejas.
- Incluir sistemas de recogida del destilado en las paredes laterales del destilador y sistema de recogida de agua de lluvias en las paredes exteriores del invernadero. Objetivo: aumentar el volumen diario de destilado/agua desalada.



BIBLIOGRAFÍA

Abdallah, S., Badran, O., & Abu-Khader, M. M. (2008). Performance evaluation of a modified design of a single slope solar still. *Desalination* , 219, 222-230.

Abdulhaiy, M., & Hassan, E. S. (2005). Abdulhaiy Thermal performance of greenhouses with a built-in solar distillation system: experimental study. *Desalination* , 181, 193-205.

Abdulrahman, G., & Arif, H. (1997). Software to analyze solar stills and an experimental study on the effects of the cover. *Desalination* .

Akash, B., Mohsen, M., Osta, O., & Elayan, Y. (1998). *Renew Energy* .

Al-Hinai, H., Al-Nassri, M. S., & Jubran, B. A. (2002). Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. *Energy Conversion and Management* , 43, 1639-1650.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1987). Calidad del agua en la agricultura, FAO. Roma.

Baum, V. A., & Bairamov, R. (1964). Heat and mass transfer processes in solar stills of hot-box type. *Solar Energy* .

Cappelletti, G. M. (2002). An experiment with a plastic solar still. *Desalination* , 142 (3), 221-227.

Castilla, N. (2007). *Invernaderos de Plástico: Tecnología y manejo*.

Chabi, M. T. (2000). An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas. *Desalination* , 127, 119-133.

Chabi, M. T. (2000). Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof. *Desalination* (128), 123-138.

Chabi, M. T. (2003). Greenhouse Systems with Integrated Water Desalination for Arid Areas Based on solar Energy.



- Chabi, M. T., & Jilar, T. (2004). System design, operation and performance of roof-integrated desalination in greenhouses. *Solar Energy* (76), 545-561.
- Cooper, P. I. (1969). Digital simulation of transient solar still process. *Solar Energy* .
- Delyannis, E. E., & Belessiotis, V. (1995). Desalination and Water Reuse.
- Dimri, V., Sarkar, B., Singh, U., & Tiwari, G. N. (2008). Effect of condensing cover material on yield of an active solar still: an experimental validation. *Desalination* , 227, 178-189.
- Dunkle, R. (1961). Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still. *International Heat Transfers Conference, Part V*. University of Colorado.
- Earth Observatory*. (2008). Recuperado el 2008, de <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Water/>
- Fernandez, J., & Chargoy, N. (1990). Multi-stage indirect heated solar still. *Solar Energy* .
- Fernández, M., Orgaz, F., Fereres, E., López, J., Céspedes, A., Pérez, J., y otros. (2006). *Progamación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudoeste español*. CAJAMAR.
- Garzoli, K. (1989). *Acta Horticulturae . Energy efficient greenhouses* .
- Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente*. (2005).
- Inverdaderos. (2006). *Consumer Eroski* .
- Malik, M., Tiwari, G., Kumar, A., & Sodha, M. (1982). Solar Distillation. *Pergamon Press* .
- Mamlook, R., & Badran, O. (2007). Fuzzy sets implementation for the evaluation of factores affecting solar still production. *Desalination* , 203, 394-402.
- Marí, E. G., Colomer, R. P., & Blaise-Ombrecht, C. A. (2007). Performance analysis of a solar still integrated in a greenhouse. *Desalination* .
- Marmól, J. R. (2008). *Agua, suelo y Fertirrigación de cultivos hortícolas en invernadero*.



Meukam, P., Njomo, D., Gbane, A., & Toure, S. (2004). Experimental optimization of a solar still: application to alcohol distillation. *Chemical engineering and processing* , 43, 1569-1577.

Miliarium - Ingenieria Civil y Medio Ambiente. (s.f.). Obtenido de www.miliarium.com

Morse, R. N., & Read, W. R. (1968). A rational basis for the engineering development of a solar still. *Solar Energy* .

Nijmeh, S., Odeh, S., & Akash, B. (2005). Experimental and theoretical study of a single-basin solar still in Jordan. *Heat Mass Transfer* , 2005.

Oztoker, U., & Selcuk, M. K. (1971). Theoretical analysis of system combining a solar still with a controlled environment greenhouse.

Parker, B. F. (1991). *Solar Energy in Agriculture*.

Rosell, J. (2007). *Y Después del Petróleo, Qué?* Barcelona: Deusto.

Rothschild, & Mancinelli. (2001). *Life in extreme Environments*.

Selcuk, M. K., & Tran, V. V. (1975). *Conference on Heliothermique and Developmente*. Dhahran.

Smil, V. (1991). *General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization*.

Solar Computer House. (2008). Recuperado el 2008, de <http://www.solcomhouse.com/solarpower.htm>

Srivastava, N. S., Din, M., & Tiwari, G. N. (2000). Performance evaluation of distillation-cum-greehouse for a warm and humid climate. *Desalination* (128), 67-80.

Tanji, K. K., & Enos, C. A. (1994). Global water resources and agricultural use. *Management of water use in agriculture* , 4-24.

Trombe, F., & Foex, M. (1961). Utilisation of solar still energy for simultaneous distillation of brackish water and air conditioning of hot houses in arid regions. *UN, Conference on New Sources of Energy* .



U.S.G.S. (2008). Obtenido de United States Geological Survey:
<http://ga.water.usgs.gov/edu/waterdistribution.html>

Uriarte, A. (2008). *História del Clima de la Tierra*. Recuperado el 2009, de
http://web.me.com/uriarte/Historia_del_Clima_de_la_Tierra/Historia_del_clima_de_la_Tierra.html

Water in a changing World. (2009). *UN World Water Development Report 3 - Water in a changing World*. Unesco.

Wittwer, S., & Castilla, N. (1995). Protected Cultivation of horticultural crop, worldwide. *Horttechnology*, 5(1), 6-23.

World Health Organization. (2008). Recuperado el 2008, de
http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/vector/water_resources.htm



ANEXO 1

Gráficos y tablas para analizar la calidad de las aguas para riego, mediante los distintos grados de CE y RAS y su interrelación.

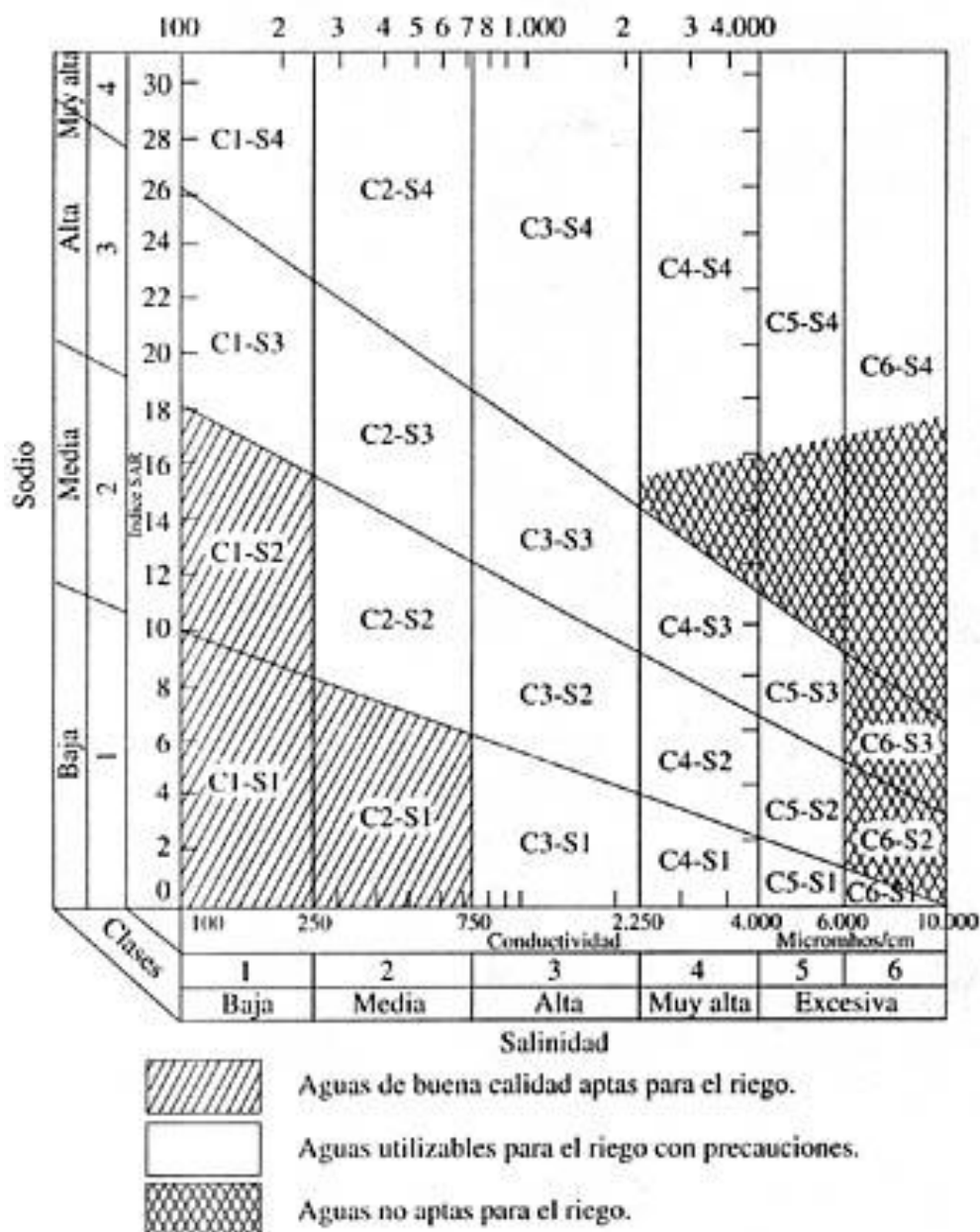


Figura A1a - Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego. (U.S. Soil Salinity Laboratory).

Fuente: Blasco y de la Rubia (Lab. de suelos IRYDA, 1973)



Tabla A1a - Clasificaciones de las aguas según las normas Riverside

TIPOS	CALIDAD Y NORMAS DE USO
C ₁	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C ₂	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C ₃	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C ₄	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C ₅	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
C ₆	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
S ₁	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S ₂	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario
S ₃	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
S ₄	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

Por otro lado, la permeabilidad del sustrato influye de forma notable en la definición de la calidad del agua de riego, ya que es necesario conocer el suelo para determinar el riesgo de salinidad y de sodio. En las figuras 1 y 2 se muestra gráficamente la incidencia de la permeabilidad del suelo. También es aconsejable considerar el análisis del suelo, para prever la interacción del agua de riego, que va a ser determinante sobre la nutrición de la



planta. En la figura 3 se muestra gráficamente la clasificación de Wilcox, que relaciona la CE con el porcentaje de sodio respecto al total de cationes.

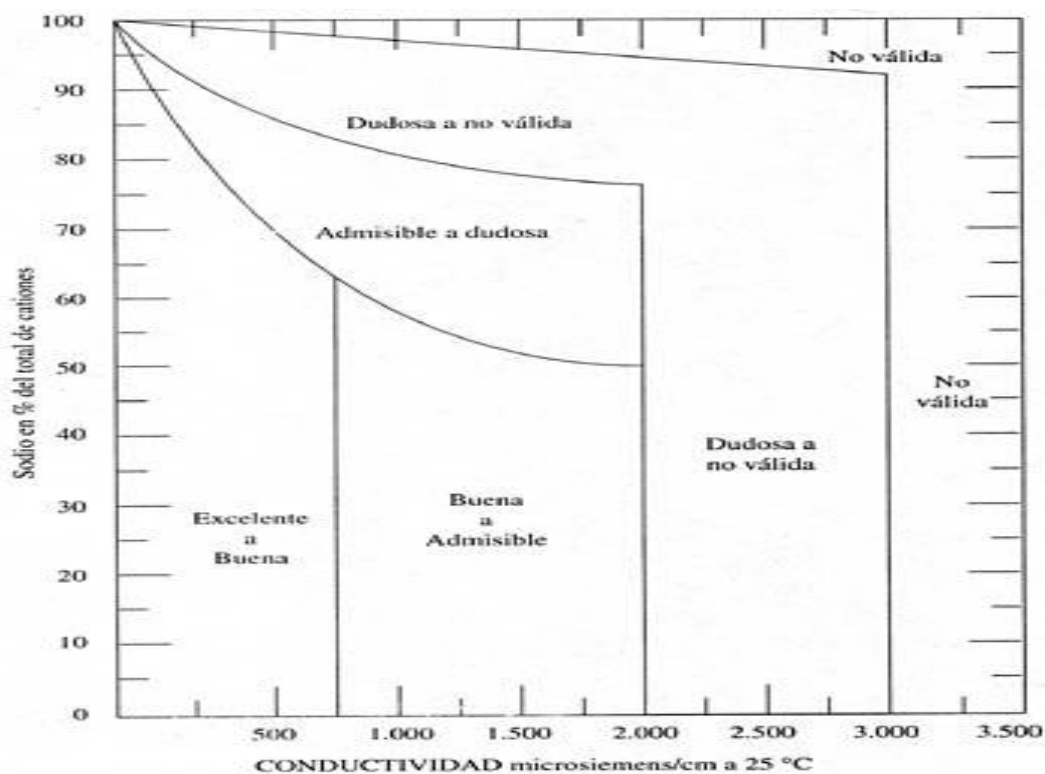


Figura A1b - Clasificación de las aguas de riego basada en el riego de salinidad. Fuente: Cánovas (1986)

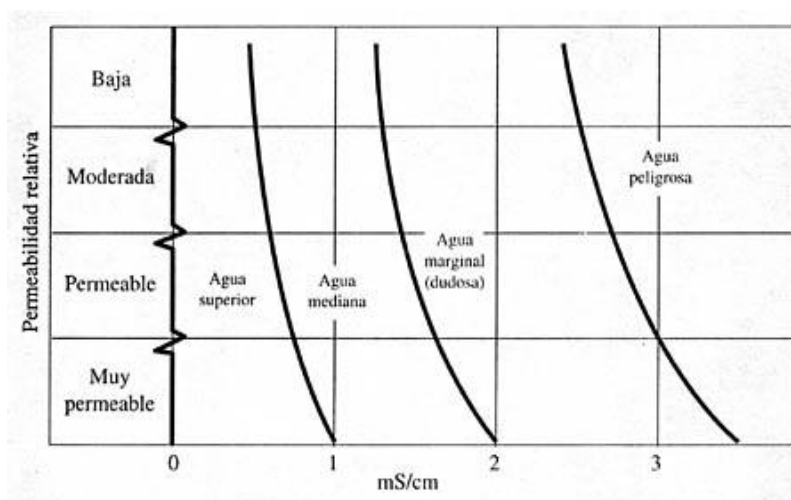


Figura A1c - Clasificación de las aguas de riego basada en el riego de sodio. Fuente: Cánovas (1986)

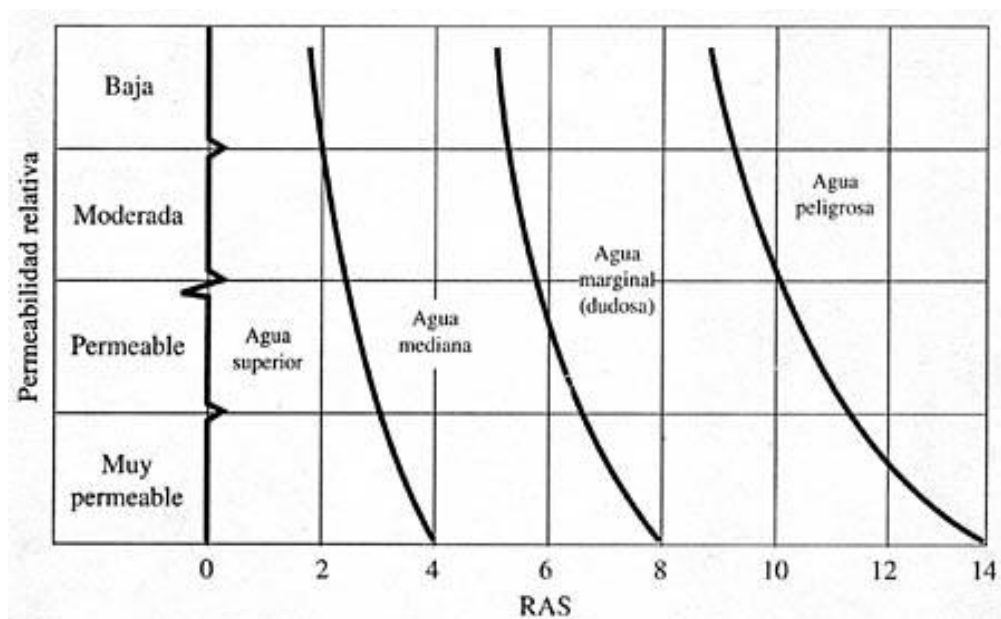


Figura A1d- Normas de L.V. Wilcox. Diagrama para la interpretación de un agua de riego. (Adaptado de "The Quality of Water for Irrigation USE", U.S.D.A). Fuente Cánovas (1986)



ANEXO 2

Tabla A2a – Volúmenes de agua disponible para riego y su conductividad eléctrica después de su dilución con el volumen de agua destilada producido durante el día 28-29 de Enero.

Volumen agua destilada (l/m ² .d)	Volumen agua salada (l/m ² .d)	Volumen total (l/m ² .d)	% dilución	Conductividad eléctrica del agua salada				
				1	1,5	2	2,5	3
0,322	4,300	4,622	7,0	0,930	1,395	1,861	2,326	2,791
0,322	4,050	4,372	7,4	0,926	1,390	1,853	2,316	2,779
0,322	3,800	4,122	7,8	0,922	1,383	1,844	2,305	2,766
0,322	3,550	3,872	8,3	0,917	1,375	1,834	2,292	2,751
0,322	3,300	3,622	8,9	0,911	1,367	1,822	2,278	2,733
0,322	3,050	3,372	9,5	0,905	1,357	1,809	2,261	2,714
0,322	2,800	3,122	10,3	0,897	1,345	1,794	2,242	2,691
0,322	2,550	2,872	11,2	0,888	1,332	1,776	2,220	2,664
0,322	2,300	2,622	12,3	0,877	1,316	1,754	2,193	2,632
0,322	2,050	2,372	13,6	0,864	1,296	1,728	2,161	2,593
0,322	1,800	2,122	15,2	0,848	1,272	1,697	2,121	2,545
0,322	1,550	1,872	17,2	0,828	1,242	1,656	2,070	2,484
0,322	1,300	1,622	19,9	0,801	1,202	1,603	2,004	2,404
0,322	1,050	1,372	23,5	0,765	1,148	1,531	1,913	2,296
0,322	0,800	1,122	28,7	0,713	1,070	1,426	1,783	2,139
0,322	0,550	0,872	36,9	0,631	0,946	1,261	1,577	1,892
0,322	0,500	0,822	39,2	0,608	0,912	1,217	1,521	1,825
0,322	0,450	0,772	41,7	0,583	0,874	1,166	1,457	1,749
0,322	0,400	0,722	44,6	0,554	0,831	1,108	1,385	1,662
0,322	0,350	0,672	47,9	0,521	0,781	1,042	1,302	1,563
0,322	0,300	0,622	51,8	0,482	0,723	0,965	1,206	1,447
0,322	0,250	0,572	56,3	0,437	0,656	0,874	1,093	1,311
0,322	0,200	0,522	61,7	0,383	0,575	0,766	0,958	1,149
0,322	0,150	0,472	68,2	0,318	0,477	0,636	0,794	0,953



Tabla A2b - Volúmenes de agua disponible para riego y su conductividad eléctrica después de su dilución con el volumen de agua destilada producido durante el día 27-28 de Abril.

Volumen agua destilada (l/m ² .d)	Volumen agua salada (l/m ² .d)	Volumen total (l/m ² .d)	% dilución	Conductividad eléctrica del agua salada				
				1	1,5	2	2,5	3
0,368	4,300	4,668	7,9	0,921	1,382	1,842	2,303	2,763
0,368	4,050	4,418	8,3	0,917	1,375	1,833	2,292	2,750
0,368	3,800	4,168	8,8	0,912	1,368	1,823	2,279	2,735
0,368	3,550	3,918	9,4	0,906	1,359	1,812	2,265	2,718
0,368	3,300	3,668	10,0	0,900	1,350	1,799	2,249	2,699
0,368	3,050	3,418	10,8	0,892	1,339	1,785	2,231	2,677
0,368	2,800	3,168	11,6	0,884	1,326	1,768	2,210	2,652
0,368	2,550	2,918	12,6	0,874	1,311	1,748	2,185	2,622
0,368	2,300	2,668	13,8	0,862	1,293	1,724	2,155	2,586
0,368	2,050	2,418	15,2	0,848	1,272	1,696	2,120	2,543
0,368	1,800	2,168	17,0	0,830	1,245	1,661	2,076	2,491
0,368	1,550	1,918	19,2	0,808	1,212	1,616	2,020	2,424
0,368	1,300	1,668	22,1	0,779	1,169	1,559	1,948	2,338
0,368	1,050	1,418	26,0	0,740	1,111	1,481	1,851	2,221
0,368	0,800	1,168	31,5	0,685	1,027	1,370	1,712	2,055
0,368	0,550	0,918	40,1	0,599	0,899	1,198	1,498	1,797
0,368	0,500	0,868	42,4	0,576	0,864	1,152	1,440	1,728
0,368	0,450	0,818	45,0	0,550	0,825	1,100	1,375	1,650
0,368	0,400	0,768	47,9	0,521	0,781	1,042	1,302	1,563
0,368	0,350	0,718	51,3	0,487	0,731	0,975	1,219	1,462
0,368	0,300	0,668	55,1	0,449	0,674	0,898	1,123	1,347
0,368	0,250	0,618	59,5	0,405	0,607	0,809	1,011	1,214
0,368	0,200	0,568	64,8	0,352	0,528	0,704	0,880	1,056
0,368	0,150	0,518	71,0	0,290	0,434	0,579	0,724	0,869



Tabla A2c - Volúmenes de agua disponible para riego y su conductividad eléctrica después de su dilución con el volumen de agua destilada producido durante el día 7-8 de Mayo.

Volumen agua destilada (l/m ² .d)	Volumen agua salada (l/m ² .d)	Volumen total (l/m ² .d)	% dilución	Conductividad eléctrica del agua salada				
				1	1,5	2	2,5	3
0,258	4,300	4,558	5,7	0,943	1,415	1,887	2,358	2,830
0,258	4,050	4,308	6,0	0,940	1,410	1,880	2,350	2,820
0,258	3,800	4,058	6,4	0,936	1,405	1,873	2,341	2,809
0,258	3,550	3,808	6,8	0,932	1,398	1,864	2,331	2,797
0,258	3,300	3,558	7,3	0,927	1,391	1,855	2,319	2,782
0,258	3,050	3,308	7,8	0,922	1,383	1,844	2,305	2,766
0,258	2,800	3,058	8,4	0,916	1,373	1,831	2,289	2,747
0,258	2,550	2,808	9,2	0,908	1,362	1,816	2,270	2,724
0,258	2,300	2,558	10,1	0,899	1,349	1,798	2,248	2,697
0,258	2,050	2,308	11,2	0,888	1,332	1,776	2,221	2,665
0,258	1,800	2,058	12,5	0,875	1,312	1,749	2,187	2,624
0,258	1,550	1,808	14,3	0,857	1,286	1,715	2,143	2,572
0,258	1,300	1,558	16,6	0,834	1,252	1,669	2,086	2,503
0,258	1,050	1,308	19,7	0,803	1,204	1,606	2,007	2,408
0,258	0,800	1,058	24,4	0,756	1,134	1,512	1,890	2,268
0,258	0,550	0,808	31,9	0,681	1,021	1,361	1,702	2,042
0,258	0,500	0,758	34,0	0,660	0,989	1,319	1,649	1,979
0,258	0,450	0,708	36,4	0,636	0,953	1,271	1,589	1,907
0,258	0,400	0,658	39,2	0,608	0,912	1,216	1,520	1,824
0,258	0,350	0,608	42,4	0,576	0,863	1,151	1,439	1,727
0,258	0,300	0,558	46,2	0,538	0,806	1,075	1,344	1,613
0,258	0,250	0,508	50,8	0,492	0,738	0,984	1,230	1,476
0,258	0,200	0,458	56,3	0,437	0,655	0,873	1,092	1,310
0,258	0,150	0,408	63,2	0,368	0,551	0,735	0,919	1,103